

Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Wöhlerlinie der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060

Influence of testing frequency on fatigue life of aluminium wrought alloy EN AW-6060

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Christian Heinrich Fritz Fischer aus Goslar

Tag der Einreichung: 23.01.2017, Tag der Prüfung: 10.05.2017

Juni 2017 — Darmstadt — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz

2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Clemens Müller



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Maschinenbau
Fachgebiet Systemzuverlässigkeit,
Adaptronik und Maschinenakustik SAM



Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Wöhlerlinie der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060
Influence of testing frequency on fatigue life of aluminium wrought alloy EN AW-6060

Genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Christian Heinrich Fritz Fischer aus Goslar

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Clemens Müller

Tag der Einreichung: 23.01.2017

Tag der Prüfung: 10.05.2017

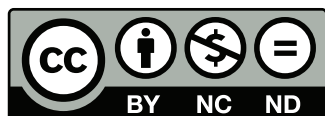
Darmstadt — D 17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-62717

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/6271>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,
E-Publishing-Service der TU Darmstadt
<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>
tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 4.0 Deutschland

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.de>

Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Wöhlerlinie der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Heinrich Fritz Fischer

aus Goslar

Berichterstatter : Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
Mitberichterstatter : Prof. Dr.-Ing. Clemens Müller
Tag der Einreichung : 23.01.2017
Tag der mündlichen Prüfung : 10.05.2017

Darmstadt 2017
D17



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet für Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM der Technischen Universität Darmstadt und am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit und für die persönlichen Entwicklungsmöglichkeiten während der Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Bei Prof. Dr.-Ing. Clemens Müller vom Fachgebiet Physikalische Metallkunde PhM der Technischen Universität Darmstadt bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats.

Ganz herzlich danke ich den Mitarbeitern des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF für die Unterstützung. Insbesondere danke ich den Mitarbeitern der Abteilung Werkstoffe und Bauteile des Fraunhofer LBF unter Leitung von Herrn Dr.-Ing. Heinz Kaufmann für die angenehme Zusammenarbeit. Ganz besonders möchte ich Herrn Dr.-Ing. Rainer Wagener für die fachlichen Diskussionen und die kritische Durchsicht der Arbeit bedanken. Den Mitarbeitern der Physikalischen Metallkunde gilt mein Dank für die Unterstützung bei den metallkundlichen Untersuchungen, Mikrostrukturabbildungen und die fachliche Unterstützung und wissenschaftlichen Diskussionen während der gemeinsamen Bearbeitung des Forschungsprojekts „Einfluss der Beanspruchungsfrequenz auf die Lebensdauer von zyklisch beanspruchten Aluminium-Knetlegierungen im VHCF-Bereich“, welches von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1466 „Life[∞]“ gefördert worden ist.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1466 „Life[∞]“.

Ein weiterer Dank gilt der Firma F.W.Brökelmann Aluminiumwerk GmbH & Co. KG für die Bereitstellung des Stangenmaterials der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und ganz besonders meiner Frau Maren, die mich während der Erstellung der Arbeit zu jeder Zeit unterstützt und mir den Rücken frei gehalten hat.

Darmstadt, im Januar 2017

Christian Fischer



Übersicht

Kurzfassung

Eine Lebensdauerabschätzung für die Bemessung zyklisch belasteter sicherheitsrelevanter Bauteile wird schon im frühen Entwicklungsstadium benötigt, bevor die ersten Prototypen für Bauteilversuche zur Verfügung stehen. Diese Lebensdauerabschätzung benötigt Werkstoffkennwerte aus Probenversuchen. Um das Schwingfestigkeitsverhalten eines Bauteils über die komplette Lebensdauer von bis zu mehreren Jahrzehnten abschätzen zu können, werden Werkstoffkennwerte mit wenigen Lastwechseln bis hin zu 10^9 Schwingspielen benötigt. Dabei werden Kennwerte aus hohen und niedrigen zyklischen Beanspruchungen bis jetzt in getrennten Wöhlerlinienkonzepten erstellt und auch getrennt betrachtet, wobei eine durchgehende Bemessungswöhlerlinie für die Lebensdauerabschätzung wünschenswert wäre.

Werkstoffkennwerte für große Lasten und eine geringe Anzahl an Lastwechseln können nach Stand der Technik nur mit dehnungsgeregelten Wöhlerversuchen im Bereich plastischer Dehnungsanteile mit niedrigen Frequenzen und höchstens mit bis zu 10^6 Schwingspielen zuverlässig erstellt werden. Zyklisch stark verfestigende Aluminiumlegierungen lassen sich hierbei nicht zufriedenstellend mit den vorhandenen Ansätzen von COFFIN, MANSON und BASQUIN auswerten. Eine neuere Auswertung mit Hilfe der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie bildet das zyklische Werkstoffverhalten zyklisch stark verfestigender Aluminiumlegierungen zwar sehr gut ab, für eine Extrapolation auf Bereiche mit bis zu 10^9 Schwingspielen, fehlt jedoch eine fundierte Basis von Versuchsergebnissen.

Demgegenüber benötigt die Erstellung von Werkstoffkennwerten mit niedrigen Lasten und Lastwechseln im Bereich von 10^6 bis 10^9 Schwingspielen in einer vertretbaren Zeit sehr viel höhere Versuchsfrequenzen, die in spannungsgeregelten Wöhlerversuchen realisiert werden. Plastische Dehnungsamplituden sind in diesem Langzeitfestigkeitsbereich so niedrig, dass für einige Werkstoffe die verwendeten Spannungen über das HOOKE'sche Gesetz lebensdaueräquivalent in Dehnungen umgerechnet werden können.

Bei einigen Aluminiumlegierungen führt jedoch eine Beanspruchung bei gleicher Last und verschiedenen Frequenzen je nach Höhe der Frequenz zu unterschiedlichen Lebensdauern, sodass hochfrequent erstellte Versuchsergebnisse in diesem Fall nicht einfach umgerechnet werden können. Eine Bewertung dieses Frequenzeinflusses ist nach Stand der Technik nicht möglich. Ein Zusammenhang zwischen der statischen Festigkeit von verschiedenen Aluminiumknetlegierungen und ein korrosiver Einfluss der Umgebungsluft werden als Ursache für den Frequenzeinfluss vermutet.

Um verschiedene Festigkeitseigenschaften bei gleicher chemischer Zusammensetzung untersuchen zu können, werden Proben aus der Aluminiumlegierung EN AW-6060 in drei verschiedenen Wärmebehandlungszuständen und somit unterschiedlichen statischen Festigkeiten untersucht. Diese werden in dehnungsgeregelten Wöhlerversuchen mit niedriger Frequenz und spannungsgeregelten Wöhlerversuchen mit den drei Frequenzen 140 Hz, 700 Hz und 20 kHz ermüdet und ausgewertet.

Diese Untersuchungen führen zu folgenden Erkenntnissen:

1. Der Elastizitätsmodul ist über die Lebensdauer konstant und darf für eine Umrechnung der Spannungs- in Dehnungsamplituden im Langzeitfestigkeitsbereich verwendet werden.
2. Je nach Wärmebehandlungszustand kann die Schwingfestigkeit von der Belastungsfrequenz abhängig oder auch nicht abhängig sein.
3. Unabhängig vom Wärmebehandlungszustand ergibt sich für die spannungsgeregelten Versuchsergebnisse im Bereich zwischen 10^6 und 10^9 Schwingspielen für alle Auslagerungszustände und Prüffrequenzen die gleiche Neigung der Wöhlerlinie, sodass sich parallele Spannungswöhlerlinien im Langzeitfestigkeitsbereich ergeben.
4. Der Frequenzeinfluss kann über eine drei-parametrische natürliche Sättigungsfunktion abgebildet werden.

Für die Erweiterung der Dehnungswöhlerlinie bis in den Bereich von 10^9 Schwingspielen wird der Ansatz der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie aufgegriffen. Über die Betrachtung des Frequenzeinflusses, des zyklisch transienten Werkstoffverhaltens und des Elastizitätsmoduls lassen sich die in spannungsgeregelten Wöhlerversuchen aufgenommenen Kennwerte in die Dehnungswöhlerlinie übertragen, die so in den Langzeitfestigkeitsbereich erweitert wird.

Die erarbeiteten Erkenntnisse ermöglichen die Bereitstellung einer durchgehenden Bemessungswöhlerlinie vom Kurzzeit- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich. Dabei führt die Nutzung hochfrequenter Prüftechnik zu einer erheblich reduzierten Versuchszeit.

Abstract

For safety components a fatigue approach is already needed in the first stage of development long before prototypes for physical tests are available. For that reason simulation programs are used. Such programs need the input of cyclic material parameters derived by material specimen testing. To extrapolate to lifetimes of several decades, material parameters up to 10^9 cycles have to be provided. Therefore material parameters for high and low material loading is needed. Until now the material data are provided in different fatigue life approaches.

Deriving material parameters for fatigue simulations with high loads and a low number of cycles, based on strain controlled specimen testing, is only possible in the area of plastic strains and low frequencies between 0.5 and 5 Hz and 10^6 cycles at maximum. Aluminum alloys with a strong cyclic hardening behavior cannot be evaluated by COFFIN-MANSON law successfully. Newer evaluation methods e.g. tri-linear [Wage07] are highly suitable for these aluminum alloys and lead to more exact material behavior values. Extrapolation up to the Very High Cycle regime (VHCF) at around 10^9 cycles is not possible until now, due to a missing data base in this region. While strain controlled testing uses low frequencies, test frequencies have to be increased to get results in the region of 10^6 to 10^9 cycles in a reasonable time span. Furthermore, controlling the strain for small loads is not possible since small strain variation lead to high load variations. In this region plastic strain amplitudes are small enough to derive the strain amplitudes from load controlled testing by HOOKE's law.

Some aluminum alloys show different number of cycles to failure after loading with same loads but different frequencies. In this cases the load values cannot be transferred into strain values easily. An assessment of the influence of the test frequency is not possible to date. A correlation between static material parameters and corrosive influence of ambient air is presumed to have a stake in the influence of test frequency. To investigate this influences within one chemical composition three different heat treatment conditions (T4, T6, T7) of precipitation hardening aluminum wrought alloy EN AW-6060 are used.

All heat treatment conditions are examined in strain controlled tests between 0.5 and 5 Hz up to 10^6 cycles as well as in load controlled tests with 140 Hz, 700 Hz and 20 kHz in the region of 10^6 to 10^9 cycles.

The results can be summarized as follows:

1. YOUNG's modulus is constant during the whole lifetime and can be used for transforming load controlled test values into strains.
2. For stress controlled testing of EN AW-6060 resulting cycles to failure depend on heat treatment condition and test frequencies. Heat treatment conditions T6 and T7 thereby show an extensive influence of the test frequency whereas the results of T4 indicate no significant influence of the test frequency.
3. An uniform slope k^* of the SN-curve can be used for all heat treatment conditions in the region of 10^6 to 10^9 cycles. This leads to parallel SN-curves of all heat treatment conditions.
4. The influence of the test frequency can be specified by a three parametric saturation function.

Following up on the tri-linear approach the strain life curve will be extended up to 10^9 cycles. Considering the function of frequency influence, the cyclic hardening or softening material behavior and YOUNG's modulus, load controlled test values can be transformed into strain values. This leads to a full description of the strain life approach up to the VHCF-regime and enormously reduced test time since test results can be generated by using high frequency test equipment.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	3
2.1. Aluminium	3
2.2. Ausscheidungshärtung	7
2.2.1. Ausscheidungsmechanismen von AlMgSi	7
2.2.2. Verfestigungsmechanismen	9
2.2.3. Korrosionseigenschaften	10
2.3. Statische Werkstoffkennwertermittlung	11
2.3.1. Elastizitätsmodul	11
2.4. Betriebsfestigkeit	14
2.4.1. Betriebsfeste Bemessung	15
2.4.2. Dauerfeste Bemessung	16
2.5. Ermittlung von zyklischen Werkstoffkennwerten	17
2.5.1. Spannungsgeregelte Versuche	17
2.5.2. Zeitfestigkeitsbereich	19
2.5.3. Langzeitfestigkeits- und VHCF-Bereich	21
2.5.4. Dehnungsgeregelte Versuche	25
2.5.5. Modifikation der Dehnungswöhlerlinien in den Langzeitfestigkeitsbereich	30
2.6. Frequenzeinfluss	35
2.6.1. Dehnrateneinfluss	36
2.6.2. Umgebungseinfluss der Luft	37
3. Zielsetzung	41
4. Werkstoff- und Versuchsvorbereitung	43
4.1. Versuchswerkstoff	43
4.2. Wärmebehandlung	43
4.3. Charakterisierung der Auslagerungszustände	44
4.3.1. Auslagerungszustand T4	44
4.3.2. Auslagerungszustand T6	45
4.3.3. Auslagerungszustand T7	45
4.4. Probengeometrien	47
4.5. Polieren der Probenoberfläche	49
4.6. Prüfstandsvorbereitung	50
5. Prüftechnik	51
5.1. Servohydraulische Prüfstände	51
5.2. Resonanzprüfstand	51

5.3. Piezobasierte Prüfsysteme	53
5.3.1. Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstand	53
5.3.2. Prüfmaschine mit Hochleistungs piezoaktor	56
5.4. Diskussion der Prüftechnik	57
6. Auswertung	61
6.1. Auswertung des Elastizitätsmoduls	61
6.2. Zyklisches Materialverhalten EN AW-6060	65
6.2.1. Vergleich der Dehnungswöhlerlinienmodelle	65
6.2.2. Ableitung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurven	71
6.2.3. Fazit zyklisches Werkstoffverhalten EN AW-6060	75
6.3. Schwingfestigkeit im Langzeitfestigkeitsbereich	76
6.3.1. Wöhlerergebnisse bei 140 Hz (Resonanz)	80
6.3.2. Wöhlerergebnisse bei 700 Hz (Piezo)	80
6.3.3. Wöhlerergebnisse bei 20 kHz (Ultraschall)	81
6.3.4. Auswertung des Frequenzeinflusses	83
6.3.5. Mathematische Beschreibung des Frequenzeinflusses	85
6.4. Fazit Schwingfestigkeit und Frequenzeinfluss	92
7. Erweiterung der Dehnungswöhlerlinie in den Langzeitfestigkeitsbereich	95
7.1. Neigung der Dehnungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich	95
7.2. Abknickpunkt der Dehnungswöhlerlinie zum Langzeitfestigkeitsbereich	97
7.3. Erstellen der Parameter der Dehnungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich	101
7.4. Darstellung des Verlaufs der Dehnungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich	101
7.5. Fazit der Dehnungswöhlerlinien im Langzeitfestigkeitsbereich	106
8. Zusammenfassung und Ausblick	107
8.1. Zusammenfassung	107
8.2. Ausblick	111
Literaturverzeichnis	113
A. Anhang	121
A.1. Übersicht der Versuchszeiten bei ausgewählten Frequenzen	122
A.2. Rissausprägung Aluminiumlegierung EN AW-6060 für die Zustände T4, T6 und T7	122
A.3. Versuchsergebnisse Wöhlerversuche	123
A.3.1. Wärmebehandlungszustand T4	123
A.3.2. Wärmebehandlungszustand T6	124
A.3.3. Wärmebehandlungszustand T7	125
A.3.4. Zusätzliche Wöhlerdiagramme mit Neigungen nach Sonsino und FKM	127
A.4. Auswertung des zyklischen Werkstoffverhaltens	128
A.5. Elastizitätsmodul	137
A.6. Auswertung der Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgeregelten Versuchen	139
A.7. Tabellen zur Abschätzung der Funktion des Frequenzeinflusses	140
A.8. Diagramme und Tabellen für die Auswertung der Transienzgrenze	142

A.9. Umrechnung von Versuchsergebnissen von EN AW-6060 Zustand T6 mit Hilfe des Frequenzeinflusses	144
---	-----

Abbildungsverzeichnis	145
------------------------------	------------

Tabellenverzeichnis	149
----------------------------	------------



Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen (lateinisch)

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	%	Bruchdehnung
A_F	mm^2	Querschnittsfläche
A_g	%	Gleichmaßdehnung
a_{reg}	MPa	Regressionskonstante
a_i	-	Konstante mit $i=1,2,3,\dots$
b	-	zyklischer Schwingfestigkeitsexponent
b_{reg}	MPa^{-1}	Regressionskoeffizient
\vec{b}	-	Burgersvektor
b_i	-	zyklischer Schwingfestigkeitsexponent für verschiedene Bereiche der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie
c	-	zyklischer Duktilitätsexponent
d_i	-	Konstante mit $i=1,2,3,\dots$
E	GPa	Elastizitätsmodul
E_{dyn}	GPa	Elastizitätsmodul aus Hysterese
E_{stat}	GPa	Elastizitätsmodul aus Erstbelastung
f	s^{-1}	Frequenz
k	-	Neigung der Wöhlerlinie
k^*	-	Neigung der Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt
K'	MPa	zyklischer Festigkeitskoeffizient
k_{gr}	-	Wachstumsrate
\bar{k}_{gr}	-	Gewichteter Mittelwert der Wachstumsrate
L	mm	Länge
m	kg	Masse
N	-	Schwingenspielzahl
$N_{10\%}$	-	Schwingenspielzahl für $P_{\ddot{U}} = 10\%$
$N_{50\%}$	-	Schwingenspielzahl für $P_{\ddot{U}} = 50\%$
$N_{90\%}$	-	Schwingenspielzahl für $P_{\ddot{U}} = 90\%$
N_A	-	Anrisschwingenspielzahl
N_{ak}	-	Schwingenspielzahl am Abknickpunkt
N_k	-	Schwingenspielzahl am Übergang zum dritten Bereich der Dehnungswöhlerlinie
n'	-	zyklischer Verfestigungsexponent
R	-	Spannungsverhältnis ($R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}$)
R_m	MPa	Zugfestigkeit

$R_{p0,01}$	MPa	Ersatzstreckgrenze bei 0,01 % plastischer Dehnung
$R_{p0,2}$	MPa	Ersatzstreckgrenze bei 0,2 % plastischer Dehnung
R_z	μm	gemittelte Rautiefe
$P_{\ddot{U}}$	%	Überlebenswahrscheinlichkeit
$s_{\log N}$	-	Standardabweichung der Schwingenspielzahlen
$s_{\log N, \log \sigma_a}$	MPa	Kovarianz der Schwingenspielzahlen und der Spannungsamplituden
$s_{\log \sigma_a, \log \sigma_a}$	MPa ²	Varianz der Spannungsamplituden
s_{T_σ}	-	Standardabweichung unterschiedlicher Streubreiten
T	°C	Temperatur
T_N	-	Streuspanne in Richtung der Schwingenspielzahl
$T_{\varepsilon_{e,a}}$	-	Streuspanne der elastischen Dehnungen der Dehnungswöhlerlinie
$T_{\varepsilon,3}$	-	Streuspanne der tri-linearen Wöhlerlinie im Bereich 3
T_σ	-	Streuspanne in Richtung der Spannungsamplitude
x_w	-	Wendepunkt bei Elastizitätsmodulbestimmung in Spannungsrichtung
y_w	-	Wendepunkt bei Elastizitätsmodulbestimmung in Dehnungsrichtung

Formelzeichen (griechisch)

Zeichen	Einheit	Beschreibung
---------	---------	--------------

α	-	Bezeichnung für Mischkristallzustand
$\alpha_{\text{übers}}$	-	Übersättigter α -Mischkristall
β'	-	Auscheidungsphase im Zustand T7
β''	-	Auscheidungsphase im Zustand T6
δ_w	-	Wendepunktparameter nach JANOSCHEK
Δk_{gr}	-	Schwankung der der Wachstumsrate
$\Delta \bar{k}_{gr}$	-	Schwankung des gewichteten Mittelwerts der Wachstumsrate
$\Delta \varepsilon$	%	Dehnungsänderung
$\Delta \varepsilon_{0,001}$	%	Grenze des transienten Werkstoffverhaltens (Transiensgrenze)
$\Delta \varepsilon_{1st, cyc}$	-	Abstand in Richtung der Schwingenspielzahl N zwischen der statischen und zyklischen Spannungs-Dehnungskurve
$\Delta f_{\text{influence}}$	-	Umrechnungsfaktor des Frequenzeinflusses
$\Delta \sigma$	MPa	Spannungsänderung
ε	%	Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	$\frac{\%}{s^{-1}}$	Dehnrage, Dehngeschwindigkeit
$\varepsilon_{a,1st}$	%	Dehnungsanteile der Erstbelastungskurve
$\varepsilon_{a,3,10\%}$	%	Werte der tri-linearen Wöhlerline im Bereich 3 mit $P = 10\%$
$\varepsilon_{a,3,50\%}$	%	Werte der tri-linearen Wöhlerline im Bereich 3 mit $P = 50\%$
$\varepsilon_{a,3,90\%}$	%	Werte der tri-linearen Wöhlerline im Bereich 3 mit $P = 90\%$
$\varepsilon_{a,e}$	%	elastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,k}$	%	Dehnung am Übergang zum dritten Bereich der Dehnungswöhlerlinie
$\varepsilon_{a,p}$	%	plastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,t}$	%	Gesamtdehnungsamplitude
ε'_f	%	Duktilitätskoeffizient
ε_L	%	werkstoffabhängiger Korrekturwert nach KLEE

$\varepsilon_{t,G}$	%	Gesamtdehnungsgrenze
$\Sigma_{\text{Versuchszeit}}$	-	Summe der Versuchszeiten
σ	MPa	Spannung
σ_a	MPa	Spannungsamplitude
$\sigma_{a,1st}$	MPa	Spannungsanteile der Erstbelastungskurve
$\sigma_{a,f,N}$	MPa	von der Frequenz und Schwingspielzahl abhängige Spannungsamplitude
$\sigma_{a,f \rightarrow 0,N}$	MPa	untere Grenze der von der Frequenz und Schwingspielzahl abhängigen Spannungsamplitude
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty,N}$	MPa	oberer Grenze der von der Frequenz und Schwingspielzahl abhängigen Spannungsamplitude
σ_{ak}	MPa	Spannungsamplitude am Abknickpunkt
$\sigma_{a,n}$	MPa	normierte Spannungsamplitude
σ'_f	MPa	Schwingfestigkeitskoeffizient
σ'_{fi}	MPa	Schwingfestigkeitskoeffizient für tri-lineare Dehnungswöhlerlinie
σ_{max}	MPa	Maximale Spannung der Spannungamplituden
σ_{limit}	MPa	Spannung am Punkt der Transienzgrenze
σ_o	MPa	Oberspannung
σ_u	MPa	Unterspannung
Θ'	-	Verfestigungsfaktor

Abkürzungen

Abkürzung	Auflösung	Beschreibung
ASTM	<u>A</u> merican <u>S</u> ociety for <u>T</u> esting and <u>M</u> aterials	Internationale Standardisierungsorganisation
BZF	<u>B</u> eanspruchungs <u>z</u> eit <u>f</u> unktion	z. B. Sinus oder variabel
DMS	<u>D</u> ehnungs <u>m</u> ess <u>s</u> treifen	
EDX	<u>E</u> nergy <u>D</u> ispersive <u>X</u> -ray Spectroscopy	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
GP	<u>G</u> uinier- <u>P</u> reston-Zonen	Zwischenstufe zu Ausscheidungsphasen
HCF	<u>H</u> igh <u>C</u> ycle <u>F</u> atigue	Zeitfestigkeitsbereich
LBF	<u>L</u> aboratorium für <u>B</u> etriebs <u>f</u> estigkeit	Institutsbezeichnung
LCF	<u>L</u> ow <u>C</u> ycle <u>F</u> atigue	Kurzzeitfestigkeitsbereich
neg.	<u>n</u> egativ	
pos.	<u>p</u> ositiv	
SDK	<u>S</u> pannungs- <u>D</u> ehnungs <u>k</u> urve	
SSP	<u>S</u> chwings <u>p</u> iel <u>z</u> ahl	
T4	Wärmebehandlungszustand	lösungsgeglüht, abgeschreckt und kaltausgelagert
T6	Wärmebehandlungszustand	lösungsgeglüht, abgeschreckt und warmausgelagert
T7	Wärmebehandlungszustand	lösungsgeglüht, abgeschreckt, warmausgelagert und überhärtet
TEM	<u>T</u> ransmission <u>e</u> lektronen <u>m</u> ikroskop	
VHCF	<u>V</u> ery <u>H</u> igh <u>C</u> ycle <u>F</u> atigue	Bereich sehr hoher Schwingspielzahlen ($N > 10^7$)
W	Wärmebehandlungszustand	lösungsgeglüht
zykl.	<u>z</u> yklisch	

1 Einleitung

Im Betrieb können Komponenten von zyklisch belasteten Maschinen einer hohen Zahl von Lastwechseln ausgesetzt sein. Bei Lebensdauern von mehreren Jahrzehnten summieren sich diese Lastwechsel bei Komponenten von Fahrzeugen, Flugzeugen und Zügen aber auch bei stationären Maschinen wie Windgeneratoren auf mehrere Milliarden Schwingspiele auf. Eine Berücksichtigung dieser Anzahl von Lastwechseln in der Bemessung von sicherheitsrelevanten Bauteilen schon in der Entwicklungsphase ist bis heute schwierig. Die dazu verwendeten Lebensdauerberechnungsprogramme benötigen Werkstoffkennwerte aus statischen, spannungsgeregelten und dehnungsgeregelten Versuchen. Im Bereich hoher Schwingspielzahlen fehlen jedoch die notwendigen zyklischen Werkstoffkennwerte aus spannungs- und dehnungsgeregelten Versuchen sowie die Kenntnis über Schädigungsmechanismen und Verlauf der Lebensdauer. Im Labor müssen diese Schwingfestigkeitskennwerte in einem möglichst kurzen Zeitraum experimentell bestimmt werden, um Zeit und damit Kosten zu sparen [Sons03]. Ein logischer Schritt ist die Anzahl der Lastwechsel pro Zeiteinheit, also die Versuchsfrequenz, gegenüber der im Betrieb auftretenden Belastungsfrequenz zu erhöhen.

Bei der Erstellung von spannungsgeregelten Werkstoffkennwerten konnte in der Vergangenheit durch die begrenzten Möglichkeiten der Prüftechnik eine große Zahl von Lastwechseln ($> 10^7$ Schwingspiele) im Labor aufgrund der geringen Prüffrequenzen (< 30 Hz) nicht in einer wirtschaftlich angemessenen Zeit und somit innerhalb eines finanziell vertretbaren Rahmens aufgebracht werden. Ein weiterer Grund ist das Werkstoffverhalten selbst. Viele Metalle zeigen im Bereich hoher zyklischer Lasten im doppeltlogarithmischen Diagramm einen linearen Zusammenhang zwischen aufgebrachter Last und erreichter Lebensdauer, welcher die Wöhlerlinie bzw. die Zeitfestigkeitsgerade bildet. Wird die Last weiter abgesenkt, wird ein Punkt erreicht, an dem schon ein geringes Absenken der Last zu sehr hohen Schwingspielzahlen führt. Bei vielen Stählen tritt dieses Abknicken der Zeitfestigkeitsgeraden im Bereich von $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln so deutlich auf, dass eine dauerhaftertragbare Belastungsamplitude vermutet wurde. Diese vermeintliche „Dauerfestigkeit“ führte dazu, dass Werkstoffe im Labor nur bis zu $1 \cdot 10^7$ Schwingspielen getestet wurden, da diese Schwingspielzahl mit den zur Verfügung stehenden Prüfmaschinen noch mit vertretbarem Aufwand zu erreichen ist. Gaßner und Pries wiesen jedoch schon 1941 daraufhin, dass es auch nach 10^7 Lastwechseln noch zu einem Versagen kommen kann und daher Schwingfestigkeitsuntersuchungen bis mindestens $1 \cdot 10^8$ Schwingspielen durchgeführt werden sollten [Gass41, Baut41].

Für Aluminiumwerkstoffe stellt sich bei der Wöhlerlinie kein exaktes Abknicken der Wöhlergerade ein. Der Übergang vom Zeitfestigkeitsbereich zum Langzeitfestigkeitsbereich stellt sich bei Aluminiumwerkstoffen mit einem weichen Übergang dar und die Schwingfestigkeit fällt auch noch nach dem Abknickpunkt in die Langzeitfestigkeit weiter ab. Dieses Verhalten von Aluminiumlegierungen unter zyklischer Beanspruchung ist seit längeren bekannt und wissenschaftlich akzeptiert. Gängige Praxis bei der Ermittlung der Schwingfestigkeit ist dennoch die Verwendung einer Grenzschaingspielzahl $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen.

In Lebensdauerberechnungsprogrammen werden nicht nur spannungsgeregelte Werkstoffkennwerte, sondern auch Werkstoffkennwerte aus dehnungsgeregelten Versuchen verwendet. Durch

die zusätzlichen Information der veränderlichen Spannungsamplitude bei konstanter Dehnungsamplitude können auch zyklische Ver- bzw. Entfestigungsvorgänge berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu spannungsgeregelten Werkstoffkennwerten ist zudem keine Definition eines Spannungsquerschnitts notwendig. Mit Prüffrequenzen von 0,5 Hz bis maximal 5 Hz sind diese Werkstoffkennwerte jedoch bisher nur bis zu 10^6 Schwingspielen sinnvoll experimentell bestimmbar. Schon die Durchführung von Wöhlerversuchen bis zu einer Grenzschwingspielzahl von $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen benötigt mit einer Versuchsfrequenz von 5 Hz über 3 Wochen Versuchszeit. Ein Prüfergebnis für eine Probe im Bereich von $N_G = 10^9$ Schwingspielen würde sogar über 6 Jahre Prüfzeit in Anspruch nehmen, vgl. Tabelle 1.1. Ohne eine Versuchszeitverkürzung ist eine Erstellung von zyklischen Werkstoffkennwerten aus dehnungsgeregelten Versuchen im Bereich hoher Schwingspielzahlen daher nicht denkbar.

Tabelle 1.1.: Versuchzeiten für jeweils eine Probe in den Bereichen von 10^6 , 10^7 , 10^8 und 10^9 Schwingspielen bei verschiedenen Frequenzen

Schwingspiele	5 Hz	100 Hz	1000 Hz	20 kHz
10^6	2,3 Tage	3,8 Stunden	16 Minuten	0,8 Minuten
10^7	23 Tage	1 Tag	3,8 Stunden	8 Minuten
10^8	7,7 Monate	11 Tage	1 Tag	1,4 Stunden
10^9	6,3 Jahre	3,8 Monate	11 Tage	14 Stunden

Getrieben durch ständig steigenden Forderungen nach Lebensdauersteigerungen wurden Prüfungssysteme entwickelt, um das Schwingfestigkeitsverhalten von Werkstoffen im Bereich sehr hoher Schwingspielzahlen, auch Langzeitfestigkeitsbereich, Very High Cycle Fatigue (VHCF) oder Ultra High Cycle Fatigue (UHCF) Bereich genannt, untersuchen zu können.

Die Entwicklung hochfrequenter Prüftechnik auf Basis von Piezoaktuatoren ermöglicht dabei die Untersuchung des Langzeitfestigkeitsbereichs im Labor in einer akzeptablen Zeit. So können Versuchsergebnisse im Bereich von bis zu 10^9 Schwingspielen in wenigen Tagen oder sogar wenigen Stunden erstellt werden, vgl. Tabelle 1.1. Einflüsse wie die Erhöhung der Proben temperatur durch Prüfen mit hohen Frequenzen oder überlagerte zeitabhängige Einflüsse auf das Werkstoffverhalten wie Korrosion müssen dabei ausgeschlossen werden, um die gesteigerten Prüffrequenzen zur experimentellen Bestimmung der Wöhlerlinie als Grundlage für eine Lebensdauerberechnung ausnutzen zu können. Trotzdem ist anhand der bisher erzielten Versuchsergebnisse ein Einfluss der Prüffrequenz auf die resultierende Schwingfestigkeit nicht auszuschließen.

Speziell für einige Aluminiumlegierungen zeigt sich, dass die erhöhte Prüffrequenz einen starken Einfluss auf die Lebensdauer haben kann. Dieser Frequenzeinfluss wird aktuell noch diskutiert und ist bis heute nicht vollständig geklärt. Eine Methode zur Berücksichtigung der frequenzabhängigen Schwingfestigkeit existiert bis dato nicht.

In Verbindung mit den neuen hochfrequenten Prüftechniken und der ausscheidungshärtbaren Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 soll der Einfluss der Wärmebehandlung und der Frequenz auf die Lebensdauer der Aluminiumknetlegierung untersucht werden. Dabei ist das Ziel eine Methode zu entwickeln, die eine vollständige Beschreibung des Werkstoffverhaltens vom Kurzzeitfestigkeitsbereich bis in den Langzeitfestigkeitsbereich in einer wirtschaftlich ertragbaren Zeit ermöglicht.

2 Stand der Technik

2.1 Aluminium

Aluminium ist neben Sauerstoff und Silizium das dritthäufigste Element der Erde. Trotz dieses häufigen Vorkommens wurde es erst Anfang des 19. Jahrhunderts das erste Mal als Aluminium beschrieben. Da Aluminium in der Natur in Form von Oxiden und Mischoxiden wie zum Beispiel dem sehr stabilen Al_2O_3 vorkommt, ist zur Herstellung von Aluminium aus Mineralien (Primäraluminium) ein sehr hoher Energieaufwand nötig. Erst Ende des 19. Jahrhunderts wurden die Verfahren der chemischen Prozesse so umgesetzt, dass eine wirtschaftliche Produktion von Aluminium möglich wurde. 75 % der seitdem produzierten schätzungsweise 900 Millionen Tonnen Aluminiums sind auch heute noch in Benutzung, was auf die sehr gute Wiederverwertbarkeit durch Recycling aber auch auf die langen Einsatzzeiträume von Aluminium zurückzuführen ist. Die Herstellung von recyceltem Aluminium (Sekundäraluminium) verbraucht dabei 95 % weniger Energie als die Herstellung von Primäraluminium.

Seit Ende des 19. Jahrhunderts erfreut sich Aluminium als Konstruktionswerkstoff sehr großer Beliebtheit in vielen Bereichen des Maschinenbaus wie z.B. der Luft- und Raumfahrttechnik und der Automobilindustrie aber auch in vielen anderen Bereichen des täglichen Lebens. Dies hängt mit den vielseitigen Eigenschaften des Aluminiums zusammen. Das günstige Verhältnis von Festigkeit zu Dichte trägt z.B. im Automobilbau zur Gewichtseinsparung bei und hilft somit, Energie bzw. Kraftstoff zu sparen. Wegen der guten Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit findet Aluminium ein breites Anwendungsfeld im Bauwesen und bei Gegenständen des täglichen Bedarfs [Barg05].

Reines Aluminium besitzt jedoch keine große Festigkeit. Erst zusätzliche Legierungselemente geben dem Aluminium ausreichende Festigkeitseigenschaften für die Verwendung als Konstruktionswerkstoff. Die Hauptlegierungselemente von Aluminium sind Silizium (Si), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Kupfer (Cu) und Zink (Zn), die je nach Legierungszusammensetzung eine Mischkristallverfestigung oder eine Ausscheidungshärtung ermöglichen. Bei der Einordnung der verschiedenen Aluminiumlegierungen wird zwischen gießbaren Aluminiumlegierungen (Aluminiumgusslegierungen) und nicht gießbaren Aluminiumlegierungen (Aluminiumknetlegierungen) unterschieden.

Die in der Technik relevanten Legierungszusammensetzungen der Aluminiumknetlegierungen sind nach der Europäischen Norm DIN EN 573 mit EN AW- und einer 4-stelligen Normnummer versehen, welche die Aluminiumknetlegierungen nach ihren Hauptlegierungselementen einteilt. Je nach Legierungszusammensetzung sind die einzelnen Gruppen aushärtbar oder nicht aushärtbar bzw. naturhart. Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der einzelnen Legierungsgruppen und deren Möglichkeit zur Aushärtung.

Für die aushärtbaren Aluminiumlegierungen ist die Abfolge von Wärmebehandlung und mechanischer Behandlung, wie z.B. Walzen oder Recken, von großer Bedeutung. Je nach Kombination von mechanischer Behandlung und Wärmebehandlung wird eine andere Mikrostruktur im Werkstoff eingestellt, die wiederum bestimmte Festigkeitseigenschaften hat. Bei der Wärmebe-

Tabelle 2.1.: Legierungsgruppen der Aluminiumknetlegierungen

Gruppe	Zusammensetzung	Aushärtbarkeit
1XXX	Reinaluminium	nicht aushärtbar
2XXX	Al Cu	aushärtbar
3XXX	Al Mn	nicht aushärtbar
4XXX	Al Si	nicht aushärtbar
5XXX	Al Mg	nicht aushärtbar
6XXX	Al MgSi	aushärtbar
7XXX	Al ZnMg	aushärtbar
8XXX	Sonstige	nicht aushärtbar
9XXX	nicht verwendet	

handlung werden neun verschiedene Wärmebehandlungsabläufe unterschieden, die mit T1 bis T9 durch nummeriert werden, Tabelle 2.2. Eine Kaltauslagerung beschreibt dabei eine Wärmebehandlung bei Raumtemperatur.

Tabelle 2.2.: Formen der Wärmebehandlung bei Aluminiumknetlegierungen

Bezeichnung	Ablauf Wärmebehandlung
T1	abgeschreckt von der Warmformungstemperatur und kaltausgelagert
T2	abgeschreckt von der Warmformungstemperatur, kaltverfestigt und kaltausgelagert
T3	lösungsgeglüht, kaltverfestigt und kaltausgelagert
T4	lösungsgeglüht, abgeschreckt und kaltausgelagert
T5	abgeschreckt von der Warmformungstemperatur und warmausgelagert
T6	lösungsgeglüht, abgeschreckt und warmausgelagert
T7	lösungsgeglüht, abgeschreckt, warmausgelagert und überhärtet
T8	lösungsgeglüht, kaltverfestigt und warmausgelagert
T9	lösungsgeglüht, warmausgelagert und kaltverfestigt

Die Zustände T6 und T7 lassen sich noch differenzierter betrachten. Der Zustand T6 bezeichnet den maximal ausgehärteten Zustand, der die höchste quasi-statische Festigkeit liefert. T7 bezeichnet den überalterten Zustand, bei dem die Festigkeit wegen Überhärtung wieder abgenommen hat. Bei Variation der Wärmebehandlung der Zustände T6 und T7, kann mit einer zweiten Ziffer der Zustand der Festigkeit im Vergleich zum maximal ausgehärteten Zustand differenzierter dargestellt werden, Abbildung 2.1.

Die Aluminiumgusslegierungen unterscheiden sich in der Legierungszusammensetzung erheblich von den Knetlegierungen, da diese als wesentliche Anforderung die gute Gießbarkeit gewährleisten müssen [Oste07].

Aluminiumgusslegierungen sind in Europa in der Norm DIN EN 1780:2002 festgehalten, die sich von der international verwendeten Norm ANSI 35.1 (M) grundlegend unterscheidet. Die europäische Norm bezeichnet die Gusslegierungen mit EN AC- und einer 5-stelligen Nummer, deren 1. Stelle die Hauptlegierungselemente und die zweite Stelle den Legierungstyp anzeigt, Tabelle 2.3.

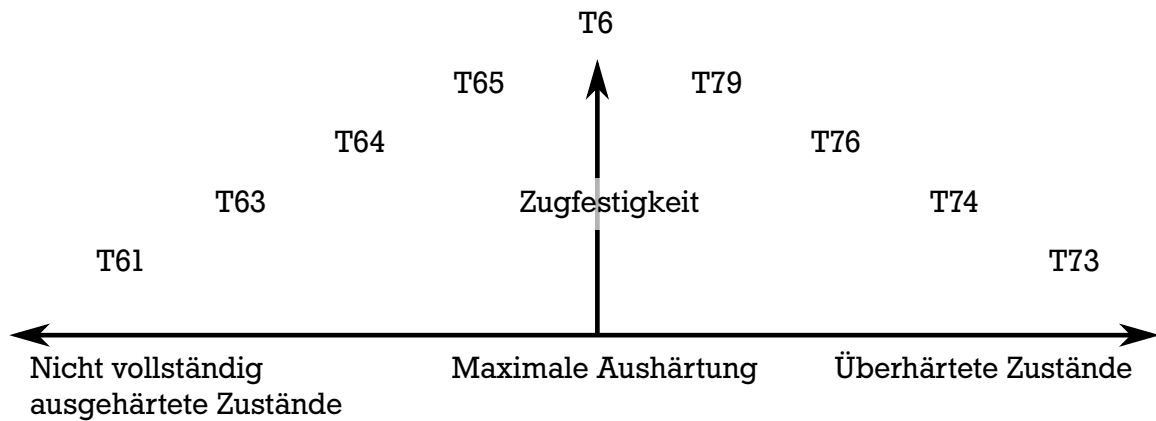


Abbildung 2.1.: Varianten der beiden Werkstoffzustände T6 und T7 nach DIN EN 515:1993 [Oste07]

In der internationalen Norm werden die Gruppen ebenfalls nach den Hauptlegierungselementen sortiert. Hier wird jedoch eine 4-stellige Nummer verwendet, deren letzte Stelle durch einen Punkt abgetrennt ist, Tabelle 2.4. Die Einordnung der einzelnen Gruppen unterscheidet sich dabei stark von der europäischen Norm.

Tabelle 2.3.: Legierungsgruppen der Aluminiumgusslegierungen nach europäischer Norm DIN EN 1780:2002 [Oste07]

Gruppe	Zusammensetzung	Aushärtbarkeit
1XXXX	Reinaluminium	nicht aushärtbar
21XXX	Al Cu	aushärtbar
41XXX	Al SiMgTi	aushärtbar
42XXX	Al Si7Mg	aushärtbar
43XXX	Al Si10Mg	aushärtbar
44XXX	Al Si	nicht aushärtbar
45XXX	Al Si5Cu	teilweise aushärtbar
46XXX	Al Si9Cu	nicht aushärtbar
47XXX	Al Si(Cu)	nicht aushärtbar
48XXX	Al SiCuNiMg	nicht aushärtbar
51XXX	Al Mg	nicht aushärtbar
71XXX	Al ZnMg	aushärtbar

Die Bezeichnung der Wärmebehandlungsschritte weicht ebenfalls von den Wärmebehandlungsbezeichnungen der Aluminiumknetlegierungen ab, ist aber in der europäischen und der internationalen Norm für Aluminiumgusslegierungen identisch festgelegt. Abhängig von der Legierungszusammensetzung können die in Tabelle 2.5 aufgeführten Wärmebehandlungszustände eingestellt werden.

Die durch die Wärmebehandlung eingestellten Festigkeitszustände beziehen sich immer auf die quasi-statischen Werkstoffeigenschaften aus dem Zugversuch. Unter zyklischer Belastung können sich die Schwingfestigkeitseigenschaften erheblich von den quasi-statischen Eigenschaften unterscheiden. Werden Aluminiumlegierungen in Bauteilen unter zyklischer Belastung eingesetzt, ist deshalb stets die Schwingfestigkeit des jeweiligen Zustands zu berücksichtigen.

Tabelle 2.4.: Legierungsgruppen der Aluminiumgusslegierungen nach internationaler Norm ANSI 35.1 (M) [Hess12]

Gruppe	Zusammensetzung
1XX.X	Reinaluminium
2XX.X	Al Cu
3XX.X	Al Si+ Cu,Mg
4XX.X	Al Si
5XX.X	Al Mg
7XX.X	Al Zn
8XX.X	Al Sn
9XX.X	Sonstige Elemente
6XX.X	Unbenutzte Legierungen

Tabelle 2.5.: Formen der Wärmebehandlung bei Aluminiumgusslegierungen

Bezeichnung	Ablauf Wärmebehandlung
T1	Kontrollierte Abkühlung nach dem Guss und kaltausgelagert
T4	Lösungsgeglüht und kaltausgelagert (wo anwendbar)
T5	Kontrollierte Abkühlung nach dem Guss und warmausgelagert oder überaltert
T6	Lösungsgeglüht und vollständig warmausgelagert
T64	Lösungsgeglüht und nicht vollständig warmausgelagert (Unteralterung)
T7	Lösungsgeglüht und überhärtet (warmausgelagerter, stabilisierter Zustand)

2.2 Ausscheidungshärtung

Der Mechanismus der Aushärtung von Aluminiumlegierungen wurde 1906 von WILM an Duraluminium, einer AlCuMg-Legierung, festgestellt. Neben den AlCu-Legierungen können bei AlZnMg- und AlMgSi-Legierungen die Festigkeitseigenschaften durch Ausscheidungshärtung erheblich gesteigert werden. Eine Voraussetzung dafür ist die Bildung und Ausscheidung von härtenden Phasen, die im α -Mischkristall kohärent und teilkohärent angeordnet sind.

Kohärente Ausscheidungen passen sich vollständig in das Werkstoffgitter des Grundwerkstoffes ein, Abbildung 2.2 a. Durch die notwendige Anpassung des Grundwerkstoffgitters an die Ausscheidung wird das Gitter des Grundwerkstoffes über einen großen Bereich verspannt. Hierdurch kommt es zu einer sehr effektiven Aufhärtung des Werkstoffes. Je nach Legierungszusammensetzung können die Ausscheidungen flächenhaft, kugelförmig, plattenförmig oder, wie bei AlMgSi-Legierungen, nadelförmig ausgebildet sein [Boma85, Edwa98].

Teilkohärente Ausscheidungen fügen sich nur teilweise in das Grundwerkstoffgitter ein und sind nur zu einem Teil mit der Phasengrenzfläche des Grundwerkstoffgitters vollständig verbunden. Das Gitter des Grundwerkstoffes wird aber auch hier verspannt, Abbildung 2.2 b.

Inkohärente Ausscheidungen passen sich nicht in das Gitter des Grundwerkstoffes ein, Abbildung 2.2 c. Der Übergang vom Grundwerkstoffgitter zum Gitter der Ausscheidung ist vergleichbar mit einer submikroskopischen Korngrenze [Barg05]. Die inkohärente Ausscheidung verspannt das Grundwerkstoffgitter nicht und hat keine direkte Bedeutung für die Aufhärtung des Werkstoffes.

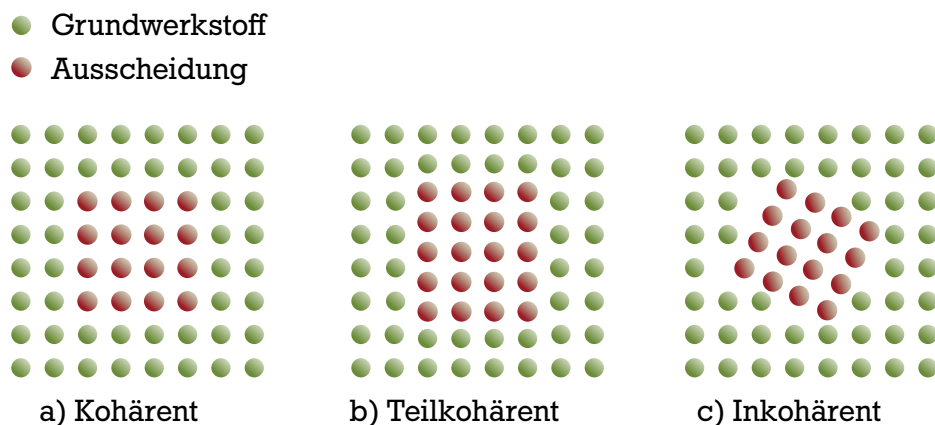


Abbildung 2.2.: Darstellung der Kohärenzformen von Ausscheidungen (schematisch) nach [Oste07]

2.2.1 Ausscheidungsmechanismen von AlMgSi

Die Ausscheidungshärtung wird am Beispiel der AlMgSi-Knetlegierungen näher erläutert, bei denen durch eine entsprechende Wärmebehandlung eine enorme Festigkeitssteigerung erzielt werden kann. Die ternären AlMgSi-Legierungen können als quasi-binäres System aus Al und der Gleichgewichtsphase Mg_2Si betrachtet werden, wobei die Löslichkeit von Mg_2Si (β) im Aluminium mit der Temperatur stark abnimmt [Oste07].

Zum Anfang des Aushärtungsprozesses werden alle Legierungselemente in Lösung gebracht, um eine optimale Verteilung der Legierungselemente zu gewährleisten. Das Lösungsglühen findet zwischen 520 °C und 560 °C statt, an das ein schnelles Abschrecken auf Raumtemperatur angeschlossen wird. Die Abkühlgeschwindigkeit hat bei hochlegierten AlMgSi-Legierungen einen

großen Effekt auf die Mikrostruktur, da sich bei zu geringer Abschreckgeschwindigkeit grobe Ausscheidungen auf den Korngrenzen bilden können. Für niedriglegierte AlMgSi-Legierungen ist die Abschreckgeschwindigkeit laut [Oste07] jedoch unkritisch, sodass sogar an bewegter Luft abgekühlt werden kann. Durch das Abschrecken wird ein übersättigter Mischkristall $\alpha_{\text{übers}}$ erzeugt, der wiederum Ausgangspunkt für die weitere Wärmebehandlung ist.

An das Abschrecken wird entweder eine Kalt- oder eine Warmauslagerung angeschlossen, welche im Folgende erklärt werden.

Kaltauslagerung

Die Kaltauslagerung wird für die AlMgSi-Legierungen bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und maximal 100 °C durchgeführt. Jedoch kann es auch bei Temperaturen weit unterhalb der Raumtemperatur zu Diffusionsvorgängen und so zu einer weiteren Aushärtung kommen.

Begünstigt durch den Leerstellenüberschuss im übersättigten Mischkristall $\alpha_{\text{übers}}$ beginnt sofort nach dem Abschrecken auf Raumtemperatur die Bildung von Si- und Mg-Clustern, die sich im weiteren Verlauf der Kaltaushärtung durch Auflösen der Mg-Cluster zu Mg/Si Co-Cluster umbilden. Durch ihre geringe Größe und noch unstrukturierte Anordnung besitzen sie nur geringe Kohärenzspannungen zum Matrixgitter und sind selbst mit hochauflösender Elektronenmikroskopie nicht zu erkennen. Die genauen Vorgänge in den frühen Phasen der Ausscheidungsentwicklung sind deshalb nur sehr schwierig zu beobachten und noch nicht abschließend geklärt. Wird die Temperatur auf 70 °C erhöht, wachsen die Co-Cluster weiter zu GP(I)-Zonen an, Abbildung 2.3.

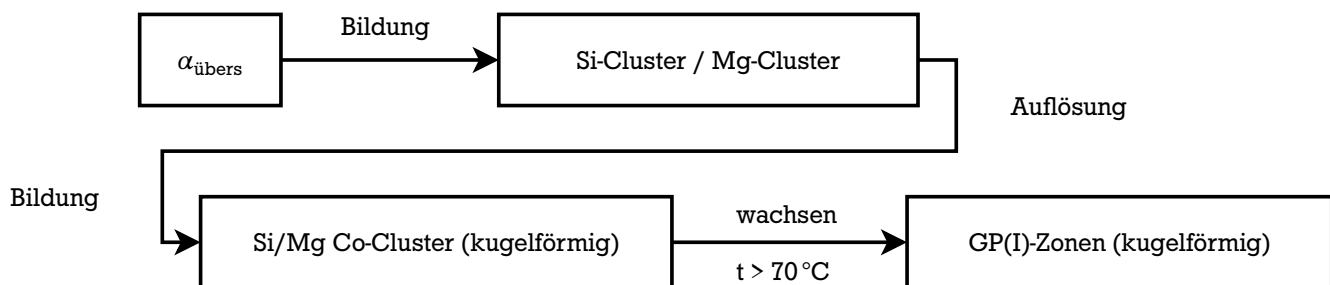


Abbildung 2.3.: Ablaufdiagramm der zeitlichen Abfolge der Umwandlungen der Kaltauslagerung

Warmauslagerung

Eine Warmauslagerung wird bei AlMgSi-Legierungen zwischen 120 °C und 250 °C durchgeführt. Je höher die Auslagerungstemperatur gewählt wird, desto eher wird das Härtemaximum erreicht, das jedoch bei höheren Auslagerungstemperaturen niedriger ausfällt. Auch eine zusätzliche Kaltauslagerung vor der Warmauslagerung kann zu Unterschieden in der Charakteristik der Aushärtung führen. Wenn einer Zwischenlagerung bei Raumtemperatur eine kurze Wärmebehandlung bei über 70 °C vorangestellt wird, kann eine weitere Festigkeitssteigerung der maximalen Härte erreicht werden [Saga96, Mura98, Yama00].

Aus dem übersättigten Mischkristall $\alpha_{\text{übers}}$ entstehen bei der Warmauslagerung im ersten Schritt GP(I)-Zonen, die im Gegensatz zu der Kaltauslagerung nadelförmig angeordnet sind und als

Vorstufe für die im nächsten Schritt entstehende β'' -Phase dient. Die β'' -Phase besteht aus nadelförmig angeordneten Mg und Si Ausscheidungen. Sie ist durch ihre sehr feine Struktur kohärent zum Matrixgitter angeordnet. Im weiteren Verlauf der Warmauslagerung werden die Nadeln zu längeren Stäbchen umgeformt, die weniger fein verteilt und teilkohärent im Matrixgitter vorliegen, Abbildung 2.4.

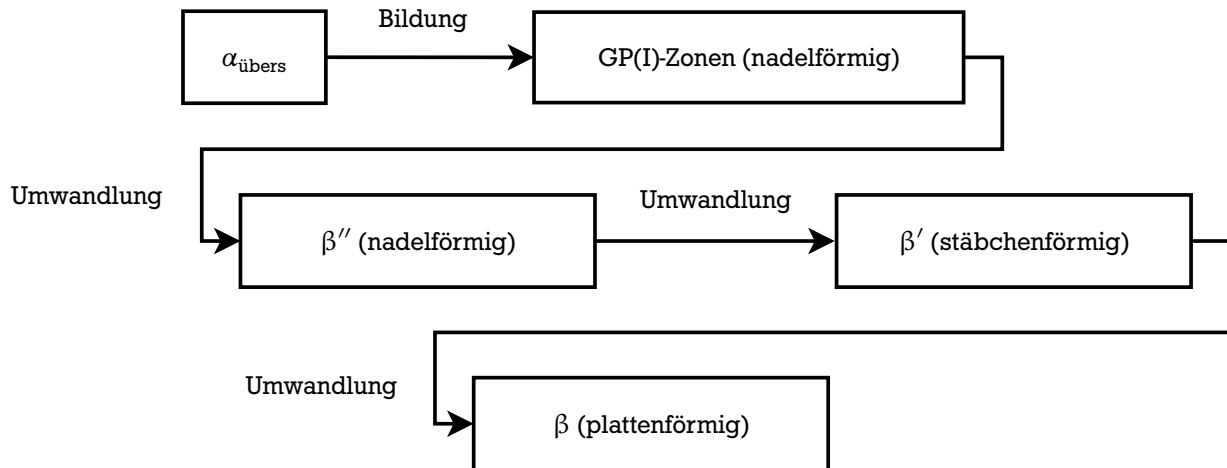


Abbildung 2.4.: Ablaufdiagramm der zeitlichen Abfolge der Umwandlungen der Warmauslagerung

2.2.2 Verfestigungsmechanismen

Treffen Versetzungen auf die eingestellten Ausscheidungsstrukturen, werden die Versetzungen in ihrer Bewegung behindert. Ein weiteres Voranschreiten der Versetzung ist nur möglich, indem die Ausscheidung von der Versetzung geschnitten oder umgangen wird. Ob eine Ausscheidung geschnitten oder umgangen wird, ist von der Größe der Ausscheidung, dem Abstand der Ausscheidungen von einander und vom Kohärenzgrad abhängig.

Kleine, kohärente Ausscheidungen werden von Versetzungen ohne großen Energieaufwand geschnitten.

Je dichter die Ausscheidungen zusammenliegen und je größer die Ausscheidungen werden, desto größer wird der Energieaufwand zum Schneiden der Ausscheidungen. Dies ist mit einem deutlichen Anstieg der Streckgrenze verbunden. Wurden die Ausscheidungen geschnitten, verschiebt sich der obere zum unteren Teil der Gleitebene um den Burgersvektor \vec{b} , Abbildung 2.5. Durch die Verschiebung wird der Durchmesser der Ausscheidung kleiner, sodass nachfolgende Versetzungen einen geringeren Energieaufwand zum Schneiden der Ausscheidung benötigen [Munz71]. Die Verformung konzentriert sich deshalb nur auf diese wenigen Gleitebenen (Grobgleiten). An den so entstandenen Gleitstufen, die an der Oberfläche austreten, können sich leicht Mikrorisse bilden [Scha03].

Werden die Ausscheidungen größer bzw. sind inkohärent im Gitter verankert und liegen weiter auseinander, so ist es für die Versetzungen energetisch günstiger, die Ausscheidungen im OROWAN-Mechanismus (Abbildung 2.6) zu umgehen. Dabei biegt sich die Versetzungslinie zwischen den Ausscheidungen hindurch und wird unter zurücklassen eines Versetzungsringes hinter der Ausscheidung wieder verbunden. Dies erhöht den Widerstand auf der Gleitebene und benachbarte Gleitebenen werden aktiviert (Feingleiten), sodass viele nebeneinanderliegende Risse auf-

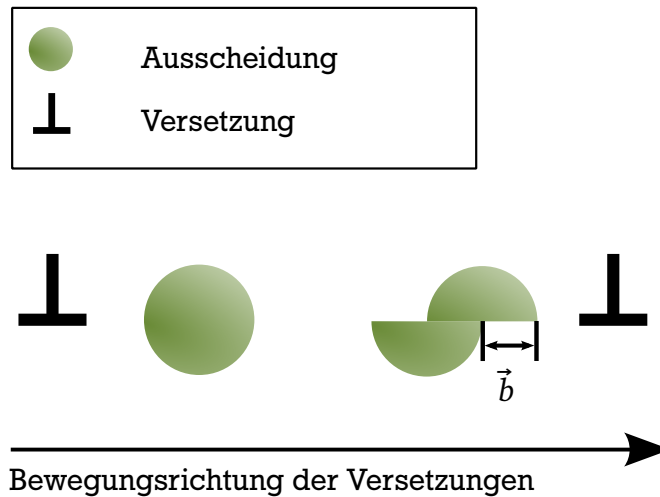


Abbildung 2.5.: Schneiden von Ausscheidungen durch Versetzungen (schematisch) nach [Munz71]

treten [Scha03]. Mit zunehmendem Abstand der Ausscheidungen nimmt die Streckgrenze des Werkstoffes ab [Alte94].

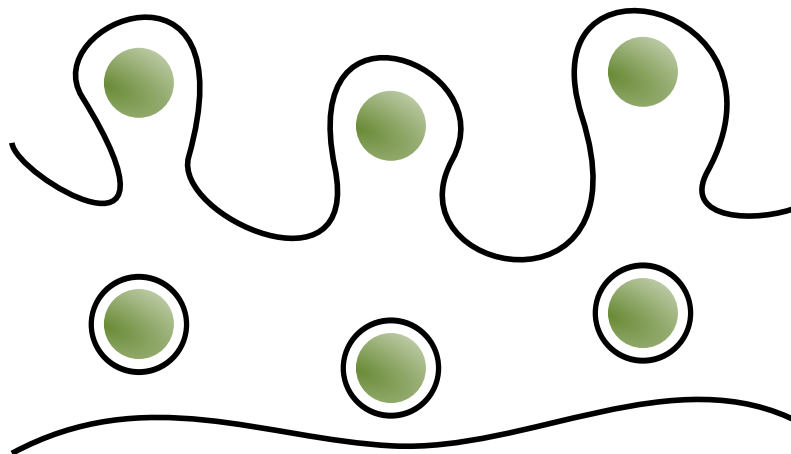


Abbildung 2.6.: Umgehen von Ausscheidungen nach dem OROWAN-Mechanismus (schematisch) nach [Alte94]

Am stärksten wird die Bewegung der Versetzungen behindert und somit die höchste Festigkeit erreicht, wenn das Schneiden der Versetzungen genauso wahrscheinlich wie ihr Umgehen ist [Barg05].

2.2.3 Korrosionseigenschaften

Aluminium hat eine hohe Affinität zu Sauerstoff. Auf freien Aluminiumoberflächen bildet sich sofort eine Oxidschicht, die innerhalb weniger Minuten auf eine Dicke von 5 nm anwächst. Eine weitere Oxidation des darunterliegenden Materials bzw. ein weiterer Materialabtrag wird durch die dichte Oxidschicht verhindert. Wird die Oxidschicht durch Kratzer verletzt, wird die freie Aluminiumoberfläche sofort wieder oxidiert und heilt aus. In feuchter Umgebungsluft wächst die Oxidschicht noch stärker an und besteht aus einer nahezu porenfreien Grund- bzw. Sperrschicht und einer porösen wasserhaltigen Deckschicht [Niel74].

Während sich Kupfer oder Eisen als Legierungselemente in Aluminiumlegierungen ungünstig auf die Korrosionseigenschaften auswirken können, besitzen Aluminiumlegierungen die Mangan (Mn), Magnesium (Mg) oder Silicium (Si) enthalten den größten Widerstand gegen Korrosionsangriffe [Alte94]. Gerade AlMgSi0,5 zeigt keine Anfälligkeit auf Spannungsrisskorrosion und auch Legierungen des Typs AlMgSi1 zeigen nur sehr selten im kaltausgelagerten Wärmebehandlungszustand eine Anfälligkeit für Spannungsrisskorrosion [Niel74].

2.3 Statische Werkstoffkennwertermittlung

Die quasi-statischen Werkstoffkennwerte werden im einaxialen Zugversuch aufgenommen. Gemessen werden Kraft und Verlängerung der Probe während diese mit konstanter Geschwindigkeit axial gedehnt wird. Wird die Kraft auf den Ausgangsquerschnitt und die Verlängerung der Probe prozentual auf die Ausgangslänge der Probe bezogen, lassen sich technische Spannungen und Dehnungen der Probe während des Versuchs bestimmen. Diese werden in einem Spannungs-Dehnungsdiagramm aufgetragen.

Aus dem Spannungs-Dehnungsverhalten lassen sich, neben anderen statischen Werkstoffkennwerten, die Zugfestigkeit R_m , die Dehngrenze $R_{p0,2}$, die Bruchdehnung A und die Gleichmaßdehnung A_g ableiten, Abbildung 2.7.

Die Zugfestigkeit R_m ist die auf den Anfangsquerschnitt der Probe bezogene größte im Versuch gemessene Kraft. Aufgrund der Einschnürung der Probe nach dem Erreichen der Zugfestigkeit werden im Versuch zur weiteren Dehnung kleinere Zugkräfte benötigt und die Spannungs-Dehnungskurve fällt wieder ab. Die Dehngrenze bezeichnet den Übergang vom linear-elastischen zum elastisch-plastischen Werkstoffverhalten. Aluminiumlegierungen besitzen keine ausgeprägte Streckgrenze, sodass der Übergang zwischen linear-elastischem zu elastisch-plastischem Werkstoffverhalten abgeschätzt werden muss. Der Spannungswert der Dehngrenze $R_{p0,2}$ wird deshalb bei 0,2 % plastischem Dehnungsanteil aufgenommen. Ist eine höhere Auflösung der Versuchsdaten vorhanden, kann die Dehngrenze auch bei 0,01 % Dehnung als $R_{p0,01}$ angegeben werden. Die Gleichmaßdehnung A_g gibt den plastischen Dehnungsanteil beim Erreichen der Zugfestigkeit an. Aus der Gleichmaßdehnung A_g lässt sich schließen, ob die Verformung spröde oder duktil verläuft. Hohe Werte der Gleichmaßdehnung sprechen für ein duktileres Verformungsverhalten, niedrige Werte für ein spröderes Verformungsverhalten.

2.3.1 Elastizitätsmodul

Für die grundlegende Festigkeitsbewertung von Werkstoffen werden in erster Linie die quasi-statischen Kennwerte aus dem Zugversuch zu Grunde gelegt. Neben der Streckgrenze und der Zugfestigkeit hat dabei der Anfangsbereich der Belastung, in dem ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung besteht, eine besondere Bedeutung. Die an den linearen Bereich angelegte Gerade lässt sich durch das HOOKE'sche Gesetz beschreiben. Die Spannung σ ergibt sich dabei aus dem Produkt des Elastizitätsmoduls E und der Dehnung ε , Gleichung 2.1.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Die Steigung dieser Geraden ist der Elastizitätsmodul E , der die Federsteifigkeit des Werkstoffs repräsentiert.

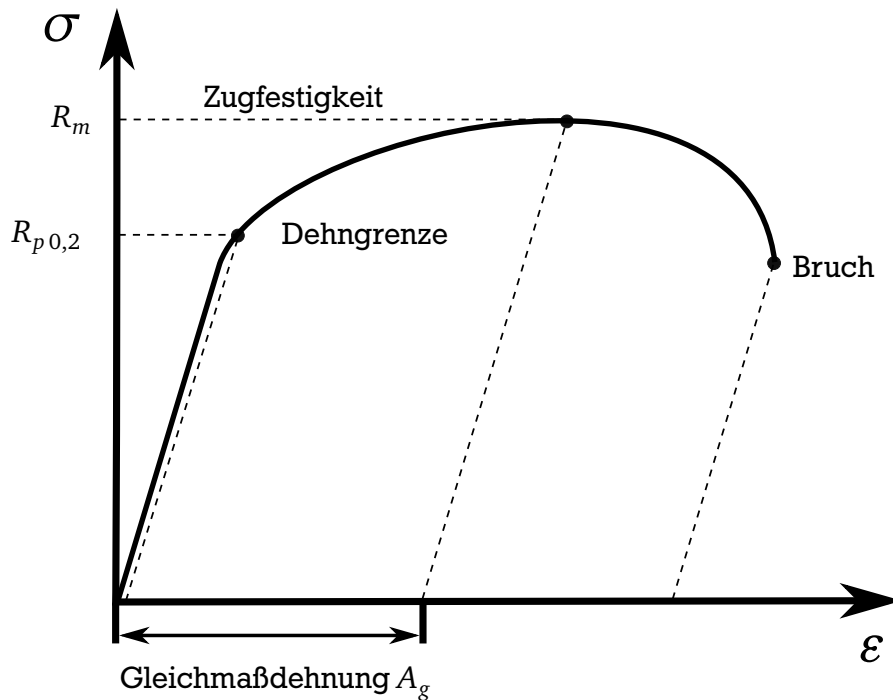


Abbildung 2.7.: Kennwerte des Zugversuchs bei Aluminiumlegierungen nach [Oste07]

In der Literatur wird die Größe des E-Moduls von Aluminiumlegierungen kontrovers diskutiert. Zum einen wird von einem konstanten E-Modul von $E = 70 \text{ GPa}$ für sämtliche Aluminiumlegierungen ausgegangen [Alte94]. Zum anderen werden die Unterschiede und Reinheitsgrade der Aluminiumlegierungen differenzierter betrachtet und je nach Eigenschaften ein E-Modul zwischen 60 GPa und 78 GPa angegeben. Für niedriglegierte Aluminiumlegierungen liegt der E-Modul in der unteren Hälfte dieses Bandes.

Die korrekte Ermittlung dieses Kennwertes wird dabei immer wieder diskutiert, [Blec04]. Je nach angewendeten Verfahren und der mit der Auswertung betrauten Person kann es bei der Ermittlung des Elastizitätsmoduls zu großen Abweichungen kommen, da der Bereich des linearen Zusammenhangs zwischen Spannung und Dehnung nicht immer eindeutig ersichtlich ist. Schon die Wahl der Stützpunkte für die HOOKE'sche Gerade kann den Betrag des E-Moduls verändern.

Um diese Abweichungen sowie Richt- und Einspanneffekte zuverlässig von der Auswertung auszuschließen, wird in der Norm für Zugversuche bei Raumtemperatur [DIN.09] empfohlen, keine festgelegten Spannungsgrenzen zu benutzen, sondern das Krümmungsverhalten der Spannungs-Dehnungskurve auszuwerten. So wird in [Hess91] ein Algorithmus vorgestellt, der das Krümmungsverhalten berücksichtigt und eine automatische Auswertung des E-Modul ermöglicht.

Das Krümmungsverhalten des Anfangsbereichs der Spannungs-Dehnungskurve wird in diesem Verfahren mit Ansatzfunktionen von kubischen Polynomen nach Gleichung 2.2 und 2.3 abgebildet.

$$\sigma = a_0 + a_1 \cdot \epsilon + a_2 \cdot \epsilon^2 + a_3 \cdot \epsilon^3 \quad (2.2)$$

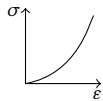
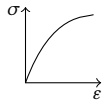
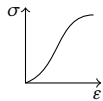
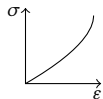
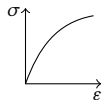
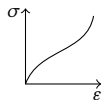
$$\epsilon = d_0 + d_1 \cdot \sigma + d_2 \cdot \sigma^2 + d_3 \cdot \sigma^3 \quad (2.3)$$

Diese Ansatzfunktionen bilden dabei mit den zu ermittelnde Konstanten a_0 bis a_3 bzw. d_0 bis d_3 jeden Kurvenverlauf ab. Ausgewählt wird die Ansatzfunktion, die den Kurvenverlauf am besten wiedergibt. Tabelle 2.6 zeigt die typischen Verläufe der Hooke'schen Geraden und die dazugehörige Ansatzfunktion. Um die Kurve auf ihren linearen Anteil zu reduzieren, wird das Krümmungsverhalten der Spannungs-Dehnungskurve ausgewertet und nach folgendem Schema ein Punkt am oberen oder unteren Ende der Spannungs-Dehnungskurve entfernt. Bei abnehmender Krümmung wird das Wertepaar mit der kleinsten bei zunehmender Krümmung das Wertepaar mit der größten Dehnung aus der Bewertung ausgeschlossen. Liegt zwischen dem untersten und dem obersten Punkt der Spannungs-Dehnungskurve ein Wendepunkt vor, (Gleichung 2.4), wird derjenige Punkt der Kurve aus der Bewertung ausgeschlossen, der vom Wendepunkt x_w bzw. y_w am weitesten entfernt ist.

$$x_w = -\frac{1}{3} \cdot \frac{a_2}{a_3} \quad \text{bzw.} \quad y_w = -\frac{1}{3} \cdot \frac{d_2}{d_3} \quad (2.4)$$

Als Abbruchkriterium wird eine Unterschreitung einer nicht weiter bestimmten Anzahl an Messwerten oder die Reduzierung der Kurve auf die linearen Anteile vorgegeben [Hess91]. Dieser Algorithmus wurde speziell für die rechnergestützte Auswertung des E-Moduls von Zugversuchen an Stählen entwickelt.

Tabelle 2.6.: Ansatzfunktion zur Beschreibung des Krümmungsverhaltens der Hooke'schen Geraden nach [Hess91]

Nr.	Krümmung	Verlauf	Beispiel	Gleichung
1	positiv	abnehmend		2.2
2	negativ	zunehmend		
3	wechselnd	wechselnd (pos.→neg.)		
4	positiv	zunehmend		2.3
5	negativ	abnehmend		
6	wechselnd	wechselnd (neg.→pos.)		

2.4 Betriebsfestigkeit

Bauteile im allgemeinen Maschinenbau sind in den meisten Anwendungsbereichen, wie z.B. im Automobilbau, der Luftfahrt oder in der Kraftwerkstechnik, nicht statischen sondern zyklischen Lasten ausgesetzt. Die wechselnden Lasten führen je nach Höhe der Last und Anzahl der Lastwechsel zum Versagen. Dies geschieht bei Lasten weit unterhalb der statisch ermittelten Zugfestigkeit. Die Lasten liegen bei langen Lebensdauern sehr häufig unterhalb der Streckgrenze des jeweiligen Werkstoffes.

Um die Beanspruchbarkeit des Werkstoffes unter konstanter Spannungsamplitude zu ermitteln, werden Schwingfestigkeitsversuche auf verschiedenen Lashorizonten durchgeführt. Werden die Ergebnisse der verschiedenen Spannungsamplituden in doppeltlogarithmischer Darstellung über der erreichten Schwingspielzahl aufgetragen, kann durch Regression eine Ausgleichfunktion berechnet werden, die als Wöhlerkurve bekannt ist, Abbildung 2.8.

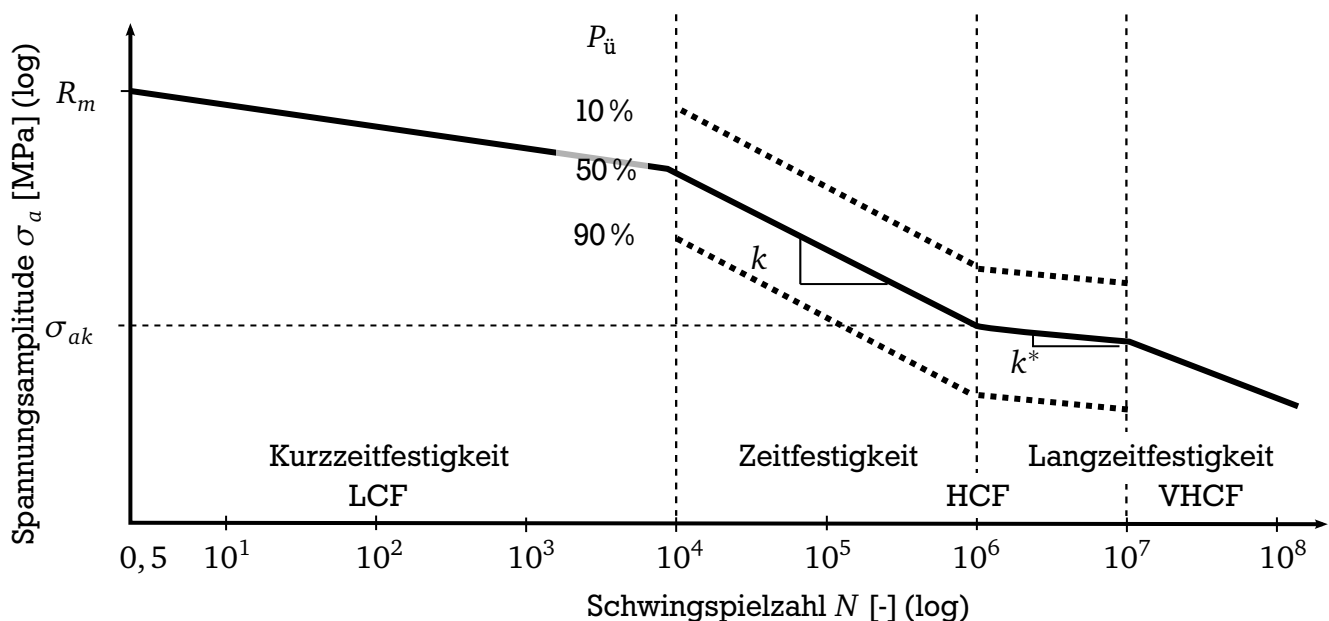


Abbildung 2.8.: Bereiche der Wöhlerlinie mit schematischem Verlauf

Das Wöhlerdiagramm lässt sich in drei Bereiche einteilen, Abbildung 2.8. Der erste Bereich, der Kurzzeitfestigkeitsbereich, auch Low Cycle Fatigue Bereich (LCF) genannt, beginnt bei einem halben Schwingspiel, welches den Zugversuch repräsentieren soll, und reicht bis zu $N = 1 \cdot 10^4$ Schwingspielen. Die Aufteilung des zweiten und dritten Bereichs unterscheidet sich im deutschen und englischen Sprachgebrauch. In der deutschen Bezeichnung, vgl. [Haib02, Rada07], schließt sich an den Kurzzeitfestigkeitsbereich der Zeitfestigkeitsbereich bis zu ca. $N = 1 \cdot 10^6$ Schwingspielen an. In diesem Bereich besteht in einer doppeltlogarithmischen Darstellung ein linearer Zusammenhang zwischen Spannungsamplitude und Schwingspielzahl. Im Bereich von ca. $N = 1 \cdot 10^6$ Schwingspielen stellt sich bei vielen metallischen Werkstoffen ein starkes Abknicken der Wöhlerlinie zu einem flachen Verlauf ein. Der flache Verlauf der Wöhlerlinie charakterisiert den dritten Bereich, den Langzeitfestigkeitsbereich. Früher wurde hier aufgrund des sehr flachen Verlaufs der Wöhlerlinie ab $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen ein vermeindlicher „Dauerfestigkeitsbereich“ angenommen, der sich bis zur klassischen Grenzwahlzahl von $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen erstreckt. Durch die limitierte Versuchsfrequenz der

Prüftechnik wird aus Zeit- und Kostengründen in den meisten Fällen nur bis zu dieser Grenze von $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen geprüft. Im englischen Sprachgebrauch, vgl. [Mans06], werden die Bereiche der Zeitfestigkeit und Langzeitfestigkeit bis zur Grenzschwingspielzahl von $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen zum High Cycle Fatigue Bereich (HCF) zusammengefasst. An diesen Bereich schließt sich dann der Very High Cycle Fatigue Bereich (VHCF) an.

Durch neuartige Prüfmaschinen, die Prüffrequenzen von bis zu 20 kHz ermöglichen, können Versuchsergebnisse über den HCF-Bereich hinaus in einer wirtschaftlich vertretbaren Zeit erreicht und ein weiterer Abfall der Wöhlerlinie im VHCF-Bereich bestätigt werden [Bath99, Sons05, Berg08, Mugh10].

Für Aluminiumlegierungen ist zudem ein weiterer Abfall der Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt wissenschaftlich belegt und allgemein anerkannt.

Für eine Bemessung der Lebensdauer von zyklisch belasteten Bauteilen ist die Information der Abhängigkeit von Lastamplitude und Schwingfestigkeit für den zu verwendenden Werkstoff von großer Bedeutung. Dabei sollte die Beanspruchbarkeit stets größer als die Beanspruchung des Bauteils sein. In der Bemessung von zyklisch belasteten Bauteilen wird zwischen betriebsfester und dauerfester Bemessung unterschieden, [Seeg96, Haib02, Sons05, Rada07, Köhl10].

Stehen Bauteile zur Verfügung, können diese Konzepte direkt anhand von Bauteilwöhlerlinien angewendet werden. In den meisten Fällen sollen jedoch während der Produktentwicklung Lebensdauern der zukünftigen Bauteile abgeschätzt werden. Hierzu muss zusätzlich mit Hilfe von Werkstoffkennwerten aus spannungs- bzw. dehnungsgeregelten Versuchen auf das Versagenverhalten geschlossen werden.

2.4.1 Betriebsfeste Bemessung

Die betriebsfeste Bemessung wird für Bauteile und Maschinen angewendet, die für eine begrenzte Lebensdauer eingesetzt werden sollen und in einem hohen Maße auf Leichtbau angewiesen sind, z.B. Autos und Flugzeuge. Dabei wird von den tatsächlichen Beanspruchungskollektiven, die aus wenigen hohen und vielen niedrigen Lasten bestehen, ausgegangen. Bei der betriebsfesten Bemessung eines Bauteiles werden Belastungen zugelassen, deren Spannungsamplituden bzw. Dehnungsamplituden deutlich im Zeitfestigkeitsbereich liegen, auch wenn die geforderte Bauteillebensdauer wesentlich länger ist. Grund hierfür ist, dass die hohen Belastungen nur sehr vereinzelt auftreten und damit nur einen sehr kleinen Anteil an der Gesamtschädigung ausmachen. Dies erlaubt bei Konstruktionen kleinere Querschnitte zu verwenden und erhöht das Leichtbaupotential.

Für die Beanspruchung wird ein Beanspruchungskollektiv zugrunde gelegt, das aus der Summe aller auftretenden Belastungsamplituden besteht. Für die Belastbarkeit werden Spannungs- oder Dehnungswöhlerlinien als Basis für die Bemessung verwendet. Wird eine Wöhlerlinie als Bemessungsgrundlage verwendet, wird über eine Schadensakkumulation die Stufenschädigung der einzelnen Belastungsstufen des Kollektives ermittelt und aufsummiert.

Bei der originalen Schadensakkumulation nach PALMGREN und MINER werden dabei nur Spannungsamplituden berücksichtigt, die vom Betrag die klassische Dauerfestigkeit überschreiten, da hierbei vorausgesetzt wird, dass Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit keinen Beitrag zur Gesamtschädigung leisten. Dabei wird jedoch nicht die Schädigung berücksichtigt, die im Laufe der Beanspruchung durch die großen Amplituden eingebracht wird und somit den Schwellwert der „Dauerfestigkeit“ im Laufe der Beanspruchung weiter reduziert. Um diese Schädigung zu berücksichtigen werden Modifikationen der PALMGREN-MINER-Regel, wie z.B. elementar, nach

HAIBACH oder LIU und ZENNER, vgl. [Haib02, Rada07], verwendet, welche die Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt zur fiktiven Dauerfestigkeit im Verhältnis zur Neigung im Zeitfestigkeitsbereich weiter abfallen lassen. Dabei wird eine sehr viel stärkere Absenkung der Festigkeit im HCF-Bereich angenommen, als durch Versuche mit konstanter Amplitude belegt wird. So sollen zusätzlich empirische Faktoren der Schädigung mit abgebildet werden. Der Verlauf der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich und VHCF-Bereich ist dabei unerheblich, [Sons07, Köhl10].

2.4.2 Dauerfeste Bemessung

Bauteile, die eine große Anzahl von Lastwechseln $N \geq 10^7$ mit überwiegend konstanter Belastungsamplitude ausgesetzt sind, werden „dauerfest“ bemessen. Hierzu gehören z.B. Motorenteile wie Kurbelwellen oder Pleuels sowie Radsatzwellen von Schienenfahrzeugen. Die Voraussetzung für diese Bemessungsmethode ist, dass die maximal auftretende Beanspruchung klein im Vergleich zur Schwingfestigkeit bei der geforderten Bauteillebensdauer ist.

Durch die Erkenntnis, dass die Wöhlerlinie auch noch nach dem Abknickpunkt weiter abfällt, darf nicht mehr von einer unendlichen Lebensdauer und einer generellen Dauerfestigkeit ausgegangen werden.

Für eine dauerfeste Bemessung ist somit nicht nur der Abknickpunkt der Wöhlerlinie, der die Höhe der fiktiven Dauerfestigkeit definiert, wichtig, sondern auch der weitere Verlauf der Wöhlerlinie im Bereich hoher Schwingspielzahlen. Nur so kann gewährleistet werden, dass kein Versagen in der angestrebten Nutzungsdauer zu erwarten ist, Abbildung 2.9.

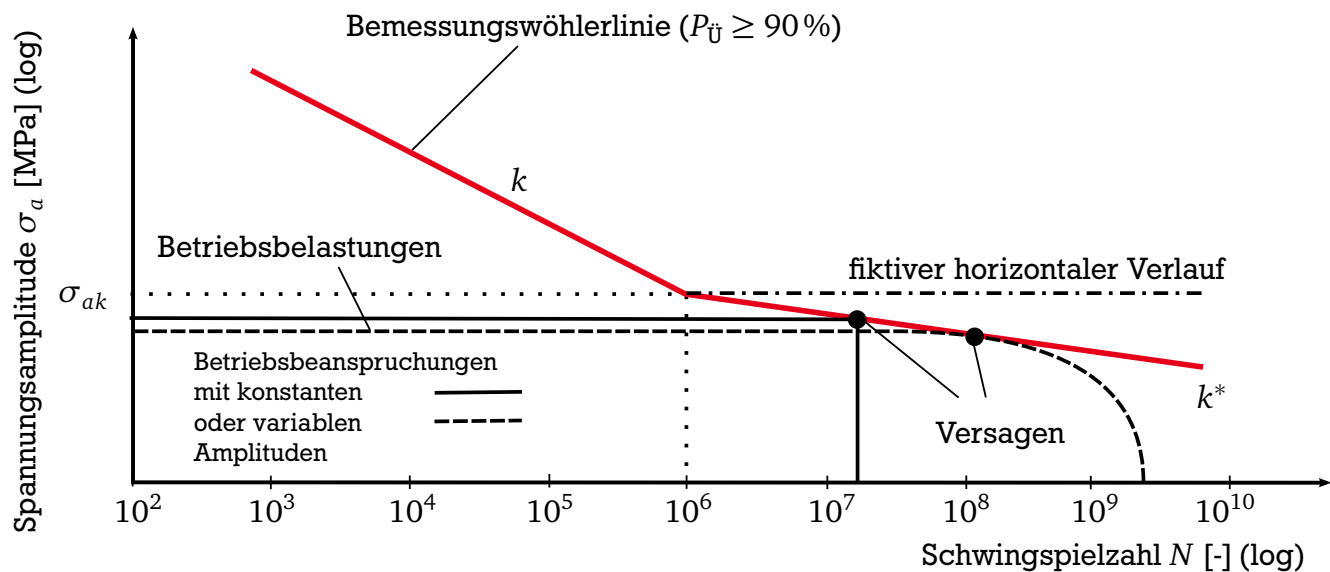


Abbildung 2.9.: Grenzen der dauerfesten Bemessung schematisch nach [Sons05]

Liegen keine Kenntnisse über den Verlauf der Wöhlerlinie im Bereich sehr hoher Schwingspielzahlen vor, so empfiehlt [Sons05], die weitere Schädigung des Werkstoffes unterhalb der Amplitude des jeweiligen Abknickpunktes durch in [Sons05] festgelegte Neigungen der Wöhlerlinie zu approximieren. Die vorgeschlagenen Neigungen nach dem Abknickpunkt k^* , s. Abbildung 2.8 und 2.9, wurden über eine Vielzahl an Versuchen gemittelt und pauschal für Stahlwerkstoffe mit 5 % Abfall pro Dekade ($k^* = 45$) und für Aluminium mit 10 % Abfall pro Dekade ($k^* = 22$) abgeleitet. Unterschiedliche Versagensmechanismen und ein Plateau in der Wöh-

lerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich werden dabei nicht berücksichtigt. Zudem kann es bei stärkeren Neigungen von k^* zu einem Überschätzen der Festigkeit des Werkstoffes Langzeitfestigkeitsbereich kommen.

Demgegenüber nimmt die FKM-Richtlinie [FKM12] für Stahl- und Eisengusswerkstoffe ab 10^6 Schwingspielen einen horizontalen Verlauf der Wöhlerlinie an, welches einen eventuellen weiteren Abfall der Schwingfestigkeit im Langzeitfestigkeitsbereich nicht berücksichtigt und somit zu unsicheren Festigkeitsbewertungen im Langzeitfestigkeitsbereich führen kann. Bei Aluminiumlegierungen wird für den Abfall der Schwingfestigkeit nach dem Abknickpunkt in der FKM-Richtlinie mit $k^* = 15$ ein stärkerer Abfall als in [Sons05] vorgeschlagen. Nach 10^8 Schwingspielen wird jedoch auch hier ein waagerechter Verlauf der Wöhlerlinie empfohlen, der bei einem weiteren Abfallen der Wöhlerlinie nach 10^8 Schwingspielen zu einer unsicheren Festigkeitsbewertung im Langzeitfestigkeitsbereich führen kann.

Aus diesen Gründen sowie der zur Nutzung des Festigkeitzpotenzials aktueller und zukünftiger Werkstoffe, ist die Kenntnis des Verlaufes der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich für die wirtschaftlich tragbare dauerfeste Bemessung unverzichtbar.

2.5 Ermittlung von zyklischen Werkstoffkennwerten

Bei Ermittlung von zyklischen Werkstoffkennwerten an Materialproben wird zwischen spannungsgeregelten und dehnungsgeregelten Versuchen unterschieden.

Durch das Abknicken des zyklischen Spannungs-Dehnungsverhaltens vom linear-elastischen in den elastisch-plastischen Bereich, sind spannungsgeregelte Versuche bei hohen Belastungsamplituden schwer umsetzbar, da kleine Änderungen bzw. Abweichungen der Regelung in der Spannung $\Delta\sigma$ eine große Änderung der Dehnung $\Delta\varepsilon$ zur Folge haben, Abbildung 2.10 b. Für Versuche mit hohen Belastungsamplituden im Kurzzeitfestigkeitsbereich werden deshalb hauptsächlich dehnungsgeregelte Versuche durchgeführt.

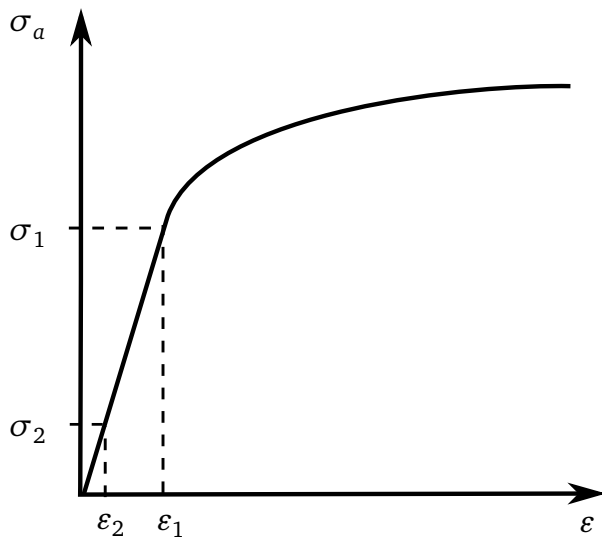
Im Gegensatz dazu werden für niedrige Belastungen spannungsgeregelte Versuche verwendet, da die Änderung der Spannung $\Delta\sigma$ genauer geregelt werden kann als die Änderung der Dehnung $\Delta\varepsilon$, Abbildung 2.10 a.

Ist die Last so gering, dass über die gesamte Lebensdauer keine makroskopisch plastischen Dehnungsanteile vorhanden sind, lassen sich die spannungsgeregelt aufgenommenen Belastungsamplituden mit Hilfe des HOOKE'schen Gesetzes, Gleichung 2.1, in Dehnungen überführen.

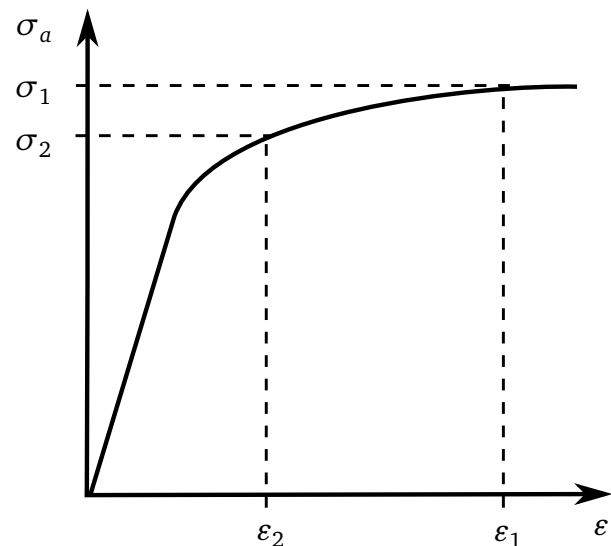
Unter zyklischer Belastung zeigen Werkstoffe zyklische Verfestigungs- bzw. Entfestigungsvorgänge. Diese transienten Werkstoffeffekte können beobachtet werden, wenn neben der geregelten Größe wie z.B. der Dehnung zusätzlich die Spannung aufgezeichnet wird. Bei zyklisch verfestigendem Werkstoffverhalten nimmt die Spannung bei gleicher Dehnung zu, während beim entfestigenden Werkstoffverhalten die Spannung abnimmt, Abbildung 2.11a. Die transienten Effekte treten zu Beginn der zyklischen Belastung auf und prägen die Wechselverformungskurve, Abbildung 2.11. In der Regel sind die transienten Vorgänge bis zum Erreichen der halben Lebensdauer abgeschlossen und es stellt sich ein stabilisiertes, zyklisches Werkstoffverhalten ein, bei dem sich Spannungs- und Dehnungsamplitude konstant verhalten.

2.5.1 Spannungsgeregelte Versuche

Als Standardverfahren zur Abschätzung von Ermüdungslebensdauern an Werkstoffen werden kraft- bzw. spannungsgeregelte Schwingfestigkeitsversuche mit sinusförmigem Signal an Werk-

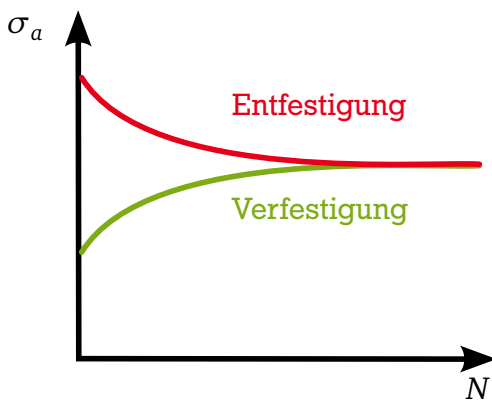


(a) Regelung σ für $\Delta\sigma > \Delta\varepsilon$

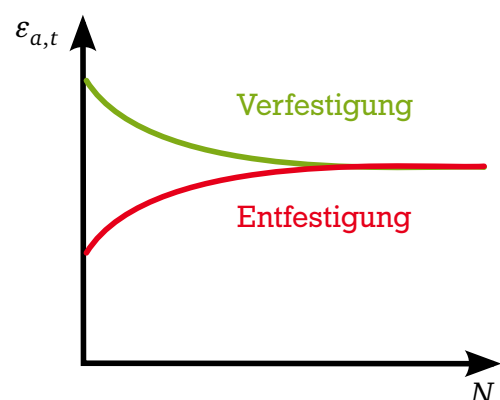


(b) Regelung ε für $\Delta\varepsilon > \Delta\sigma$

Abbildung 2.10.: Auswahlkriterien zur Wahl des geeigneten Regelungsverfahrens



(a) Bei Dehnung $\varepsilon_{a,t} = \text{const}$



(b) Bei Spannung $\sigma_a = \text{const}$

Abbildung 2.11.: Wechselverformungskurven bei (a) Dehnungsregelung und (b) Spannungsregelung, vgl. [Mans06]

stoffproben durchgeführt. Die vom Prüfstand aufgebrachte Kraft wird über den Anfangsquerschnitt der Probe in eine Nennspannung umgerechnet, die als Sollwert für die Prüfung vorgegeben wird. Für grundlegende Werkstoffuntersuchungen wird der Belastungsamplitude keine Mittelast überlagert. Das Lastverhältnis R , dass dem Quotienten aus Unterspannung σ_u und Oberspannung σ_o (Gleichung 2.5) entspricht, beträgt für diese Zug-Druck-Wechselbeanspruchung $R = -1$.

$$R = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} \quad (2.5)$$

Die an mehreren Versuchsproben ermittelten Lebensdauern werden im doppeltlogarithmischen Diagramm (Wöhlerdiagramm) dargestellt, wobei die Spannungsamplitude über der Schwingzahl aufgetragen wird, Abbildung 2.8.

2.5.2 Zeitfestigkeitsbereich

Im Zeitfestigkeitsbereich lässt sich das Werkstoffverhalten im doppeltlogarithmischen System durch eine Gerade (Zeitfestigkeitsgerade) approximieren [Basq10]. Ein Stützpunkt dieser Geraden (Gleichung 2.6) ist die Spannung σ_{ak} und die Schwingspielzahl N_{ak} am Abknickpunkt, an dem die Zeitfestigkeit in die Langzeitfestigkeit übergeht.

$$N = N_{ak} \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{ak}} \right)^{-k} \quad (2.6)$$

Der Exponent k (Gleichung 2.7) gibt dabei die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden an.

$$k = \frac{\log N_2 - \log N_1}{\log \sigma_{a1} - \log \sigma_{a2}} \quad (2.7)$$

Statistische Betrachtungen der Wöhlerversuche

Fehlstellen im Gitter, Verunreinigungen und Inhomogenitäten sind in jedem technischen Werkstoff vorhanden. In einer Werkstoffprobe sind diese nicht immer in gleicher Anzahl und an den selben Stellen vorhanden, sodass die Ergebnisse der Wöhlerversuche einer Streuung unterliegen. Im Wöhlerversuch ist die Prüfung einer ausreichenden Anzahl an Proben für eine statistische Absicherung nicht immer gegeben, sodass eine genaue Versuchsplanung und Vorwissen über die Verteilungsfunktion notwendig ist. Aus vergangenen Untersuchungen ist bekannt, dass als Verteilungsfunktion die logarithmische Normalverteilung für die Streuung von Lebensdauern auf einem Lasthorizont angenommen werden kann [Buxb86, Mauc99]. Bei der Versuchsplanung und Versuchsdurchführung von Wöhlerversuchen mit wenigen Proben haben sich das Horizonten- und das Perlenschnurverfahren bewährt [DIN.16].

Beim Horizontenverfahren werden zwei Lasthorizonte gewählt. Ein Lasthorizont liegt möglichst nahe am Übergang zum Kurzzeitfestigkeitsbereich. Der andere Lasthorizont sollte in der Nähe des Abknickpunktes zum Langzeitfestigkeitsbereich liegen. Die statistische Auswertung, das heißt die Bestimmung des Mittelwertes sowie der Streuspannen, erfolgt für jeden Horizont einzeln. Anschließend werden anhand der Mittelwerte bzw. von Werten, die der selben Überlebenswahrscheinlichkeit entsprechen, mittels linearer Regression im doppeltlogarithmischen System die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden bestimmt.

Die Robustheit der abgeleiteten Kennwerte ist sehr stark von der Wahl der Horizonte abhängig, sodass Vorwissen über das Ermüdungsverhalten erforderlich ist [Müll15].

Reicht die Kenntnis über das Ermüdungsverhalten nicht aus, um die beiden Belastungshorizonte festlegen zu können, bietet sich das Perlenschnurverfahren an, um die Schwingfestigkeit experimentell zu bestimmen. Beim Perlenschnurverfahren werden die Belastungshorizonte so gewählt, dass sich die Versuchsergebnisse wie auf einer Perlenschnur aufreihen. Zur Ableitung der Zeitfestigkeitsgeraden wird eine lineare Regression im doppeltlogarithmischen System durchgeführt. Die Regressionsgerade wird auf Basis der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. Hierfür werden die Varianz der Spannungsamplituden (Gleichung 2.8) und die Kovarianz (Gleichung 2.9) der Werte der Schwingspielzahlen und Spannungsamplituden im doppeltlogarithmischen Koordinatensystem bestimmt. Dabei repräsentiert n die Anzahl der aus-

zugleichenden Versuchspunkte. Die Regression erfolgt in Richtung der Schwingspielzahlen, das heißt die Spannungsamplitude σ_a wird vorgegeben und die Schwingspielzahl N ist die abhängige Größe.

$$s_{\log \sigma_a, \log \sigma_a} = \frac{1}{n-1} \left[\sum (\log \sigma_a)^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum \log \sigma_a \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

$$s_{\log N, \log \sigma_a} = \frac{1}{n-1} \left[\sum (\log N \cdot \log \sigma_a) - \frac{1}{n} \cdot \sum \log N \cdot \sum \log \sigma_a \right] \quad (2.9)$$

Anschließend können über die Gleichungen 2.10 und 2.11 der Regressionskoeffizient b_{reg} und die Regressionskonstante a_{reg} bestimmt werden.

$$b_{\text{reg}} = \frac{s_{\log N, \log \sigma_a}}{s_{\log \sigma_a, \log \sigma_a}} \quad (2.10)$$

$$a_{\text{reg}} = \frac{\sum \log \sigma_a - b_{\text{reg}} \cdot \sum \log N}{n} \quad (2.11)$$

Für die Regression ergibt sich die in Gleichung 2.12 dargestellte Ausgleichsgerade. Die Steigung der Geraden wird durch den Parameter b_{reg} repräsentiert, der über Gleichung 2.13 im direkten Zusammenhang mit der Neigung k der Wöhlerlinie steht.

$$\log N(\sigma_a) = a_{\text{reg}} + b_{\text{reg}} \cdot \log \sigma_a \quad (2.12)$$

$$k = -b_{\text{reg}} \quad (2.13)$$

Für die statistische Auswertung der Streuung werden alle Versuchspunkte einer Reihe parallel zur Zeitfestigkeitsgeraden auf einen fiktiven Horizont normiert, sodass die Streuung über alle Punkte gleichzeitig berechnet werden kann (Abbildung 2.12). Aufgrund der Wahl des fiktiven Lasthorizontes können nur konstante, das heißt vom Lasthorizont unabhängige Streubänder, ermittelt werden, die parallel zur Zeitfestigkeitsgeraden für die Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{U}} = 50\%$ verlaufen [Mauc99], Abbildung 2.8.

Über den Mittelwert $\log N_{50\%}$ (Gleichung 2.14) und die Standardabweichung $s_{\log N}$ der logarithmischen Schwingspielzahlen (Gleichung 2.15) kann die Streuspanne auf beliebige Überlebenswahrscheinlichkeiten extrapoliert werden, z. B. $\log N_{10\%}$ (Gleichung 2.16) und $\log N_{90\%}$ (Gleichung 2.17).

$$\log N_{50\%} = \frac{1}{n} \cdot \sum \log N \quad (2.14)$$

$$s_{\log N} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (\log N - \log N_{50\%})^2} \quad (2.15)$$

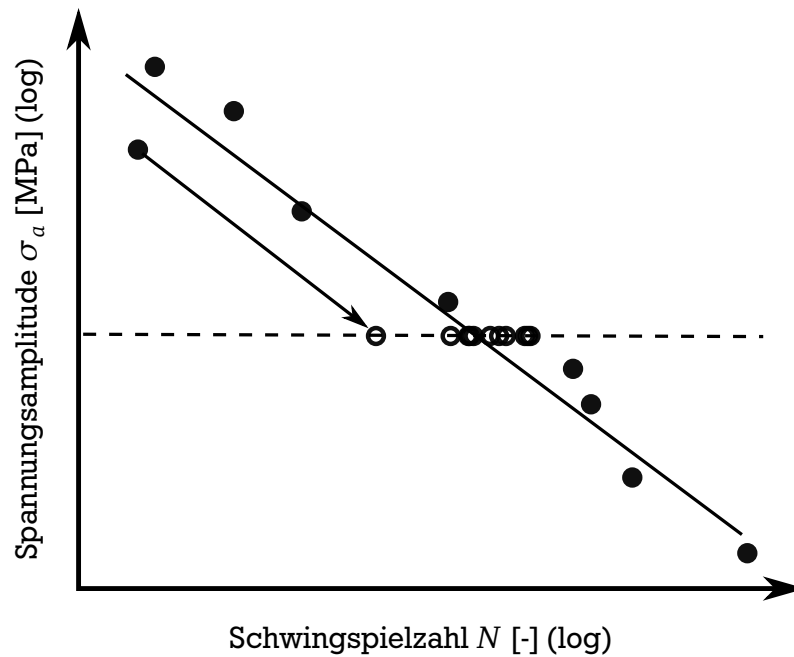


Abbildung 2.12.: Verschieben der Versuchspunkte auf einen gemeinsamen Spannungshorizont nach [Mauc99]

$$\log N_{10\%} = \log N_{50\%} + 1,28 \cdot s_{\log N} \quad (2.16)$$

$$\log N_{90\%} = \log N_{50\%} - 1,28 \cdot s_{\log N} \quad (2.17)$$

Die so berechneten Streubänder werden als unabhängig von der Belastung angenommen und verlaufen mit der gleichen Neigung k parallel zur Wöhlerlinie mit der Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{U}} = 50\%$.

Über das Verhältnis der beiden Überlebenswahrscheinlichkeiten kann mit Gleichung 2.18 die Streuspanne T_N berechnet werden.

$$T_N = \frac{N_{10\%}}{N_{90\%}} \quad (2.18)$$

Aus der Streuung in Richtung der Schwingspielzahlen T_N kann über Gleichung 2.19 die Streuung in Spannungsrichtung T_σ ermittelt werden.

$$T_\sigma = (T_N)^{\frac{1}{k}} \quad (2.19)$$

2.5.3 Langzeitfestigkeits- und VHCF-Bereich

Für den Langzeitfestigkeitsbereich wurde in der Vergangenheit wegen des nahezu waagerechten Verlaufs der Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt bei Stahlwerkstoffen eine fiktive „Dauerfestigkeit“ ($k^* \rightarrow \infty$) angenommen, die eine unendliche Lebensdauer unterhalb dieser Spannungsamplitude suggeriert. Durch diese Annahme und die eingeschränkte Prüffre-

quenz der Prüftechnik wurden die Werkstoffkennwerte nur bis zur Grenzschwingspielzahl von $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspiele aufgenommen.

Obwohl GASSNER, PRIES und BAUTZ [Gass41, Baut41] schon 1941 die vermeintliche „Dauerfestigkeit“ als Werkstoffkennwert kritisierten, ist bis heute das Abknicken der Wöhlerlinie nach dem Zeitfestigkeitsbereich als Dauerfestigkeitslinie in Normen und Richtlinien wie z.B. [FKM12] so verankert, dass die Annahme entsteht, eine Schädigung des Werkstoffes finde unterhalb der Belastungsamplitude des Abknickpunktes nicht statt.

Zahlreiche Veröffentlichungen [Bath99, Sons05, Sons07, Berg07, Berg08, Mugh10, Pytt11] belegen jedoch, dass eine Schädigung auch bei sehr viel geringeren Lastamplituden auftreten können und somit über 10^7 Schwingspiele hinaus Ermüdungslebensdauern ermittelt werden sollten. Im VHCF-Bereich kann es demnach, nach dem Plateau im Übergang zwischen Zeitfestigkeits- und Langzeitfestigkeitsbereich, zu einem weiteren Abfall der Schwingfestigkeit des Werkstoffes kommen.

Im Zeitfestigkeits- und zu Beginn des Langzeitfestigkeitsbereich werden für Werkstoffe mit kubischflächenzentriertem Kristallgitter persistente Gleitbänder (engl. persistent slip band bzw. PSB) als Schädigungsmechanismus angesehen [Thom56]. PSBs bilden sich auf der Probenoberfläche parallel zur aktiven Gleitebene aus und haben eine auffällige Oberflächenstruktur, Abbildung 2.13. Während sich in den PSBs hohe plastische Verformungen vollziehen, sind die Bereiche um die PSBs meist unbeeinflusst [Mugh84, Mugh13].

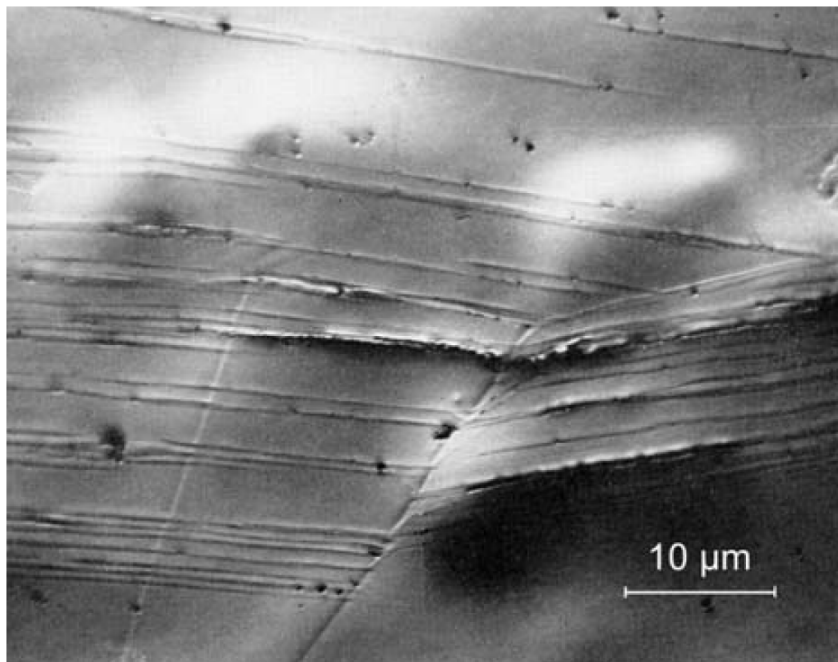


Abbildung 2.13.: Persistente Gleitbänder auf der Oberfläche einer Aluminiumlegierung [Fors63, Oste07]

Da bei den niedrigen Belastungsamplituden im VHCF-Bereich der Schwellwert für die Bildung von persistenten Gleitbändern nicht überschritten wird, wird ein Wechsel des Schädigungsmechanismus für den weiteren Abfall der Wöhlerlinie verantwortlich gemacht [Mugh06].

In [Mugh06] wird dazu eine differenzierte Unterscheidung der Versagensmechanismen vorgenommen. Dabei werden zwei Werkstoffgruppen, die mit Typ I und Typ II bezeichnet werden, näher betrachtet, die jeweils im Verlauf der Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt von einem weiteren Abfall der Wöhlerlinie ausgehen.

Typ I beinhaltet einphasige Werkstoffe, wie z.B. reines Kupfer, bei denen die Risse von der Oberfläche initiieren. An der im Anfangsstadium der Ermüdung noch glatten Werkstoffoberfläche (Abbildung 2.14 a) entsteht im Laufe der Ermüdung durch irreversible Anteile von Versetzungsbewegung zunehmend eine höhere Oberflächenrauheit (Abbildung 2.14 b), die durch Mikrokorbwirkung zu einer lokalen Spannungsüberhöhung führt. Diese Spannungsüberhöhung führt dann zur Aktivierung von persistenten Gleitbändern (Abbildung 2.14 c), die wiederum zu einer Rissinitiierung führen.

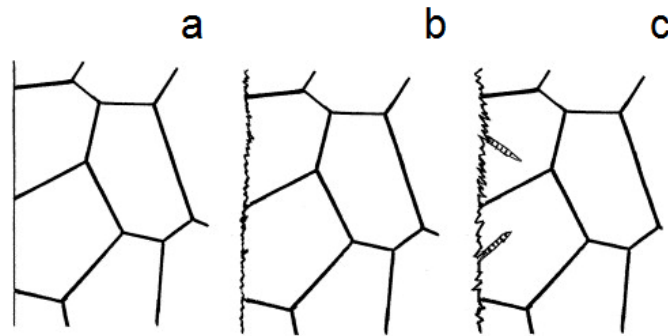


Abbildung 2.14.: Rissentstehung an der Oberfläche durch Aufrauhen der Oberfläche ausgelöst durch Gleitbandbewegungen [Mugh06], a) Unbelastete Oberfläche, b) Aufrauhen der Oberfläche durch irreversible Anteile von Versetzungsbewegung durch Ermüdung, c) Aktivierung von persistenten Gleitbändern im späteren Ermüdungsstadium führt zur Rissinitiierung

Das zyklische Werkstoffverhalten für Typ I Werkstoffe wird in [Mugh06] auf Dehnungsbasis beschrieben. So folgt das zyklische Dehnungsverhalten im Bereich I, Abbildung 2.15, der Beschreibung nach Coffin-Manson. Der Bereich II, Abbildung 2.15, beschreibt die Grenze für konventionelle Ermüdung und Risseinleitung. Im Bereich III, Abbildung 2.15, führen die Bildung persistenter Gleitbänder dennoch zu irreversiblen Dehnungen und, wie oben beschrieben, zu einer Aufrauung der Oberfläche. Mit abnehmender Dehnungsamplitude verringern sich diese Dehnungen so weit, dass die Grenze zur Bildung von persistenten Gleitbändern nur noch sehr lokal auf einzelne idealorientierte Körner durch Anhäufung von mikropersistenten Gleitbändern überschritten wird. Für den Bereich IV, Abbildung 2.15, wird eine absolute Dauerfestigkeit vermutet, da die Belastung nicht mehr für die Bildung irreversibler Dehnungen ausreicht.

Zum Typ II werden hochfeste, metallische Werkstoffe gezählt, die nichtmetallische Einschlüsse beinhalten. Dabei wird bei niedrigen Lasten im Vergleich zu hohen Lasten ein Wechsel des Versagens von der Oberfläche hin zum Versagen an inneren Einschlüssen beobachtet. Die Bruchflächen weisen einen sehr auffälligen Rissausgang auf, der als dunkle Kreisfläche um einen Einschluss zu erkennen ist. Durch seine an ein Fischauge erinnernde Form wird diese Bruchflächenstruktur auch als „fisheye“ bezeichnet und als Versagen vom inneren der Probe gedeutet. Sie kann häufig bei Typ II Werkstoffen beobachtet werden, die mit einer kleinen Spannungsamplitude im Bereich hoher Schwingungszahlen ermüdet werden (Abbildung 2.16). Durch die auffällige Charakteristik ist die Bruchflächenstruktur des „fisheye“ intensiv untersucht worden [Saka02, Mura12, Grad14], und wird oftmals als typisches Versagen im VHCF-Bereich wahrgenommen. Bruchflächen mit „fisheye“-Struktur sind jedoch auch beim Versagen im Zeitfestigkeitsbereich wie z.B. beim Versagen von Schweißnähten mit Wasserstoffeinschluss bei Feinkornbaustählen zu beobachten.

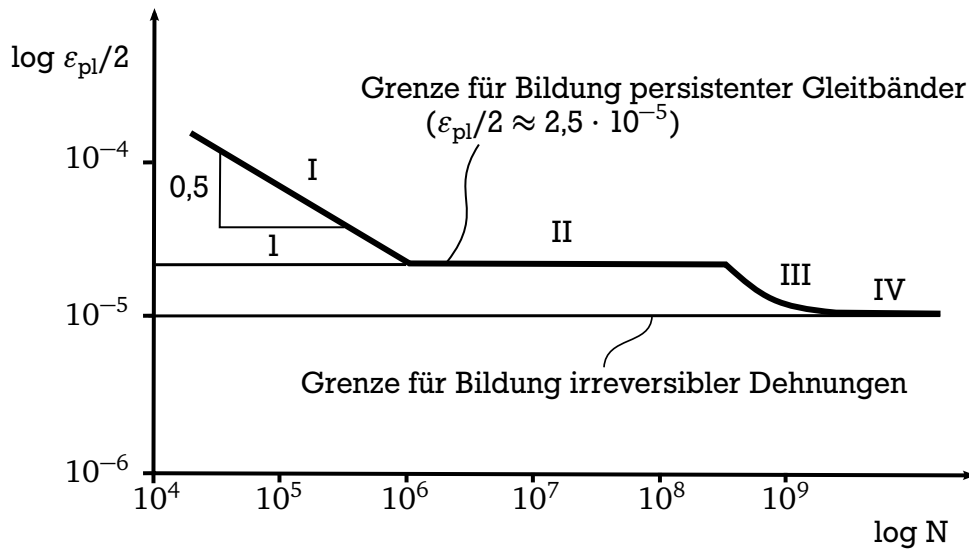


Abbildung 2.15.: Schematische Dehnungswöhlerlinie für Werkstoffe vom Typ I (einphasige Werkstoffe) nach [Mugh06]

Für die Typ II Werkstoffe wird in [Mugh06] eine Spannungswöhlerlinie vorgeschlagen, die den Wechsel des Schädigungsmechanismus von der Oberfläche hin zu inneren Defekten berücksichtigt. Die ersten beiden Bereiche in Abbildung 2.17 beschreiben demnach das klassische Versagen von der Oberfläche mit dem üblichen Abfall der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich und dem Plateau im Übergang zum Langzeitfestigkeitsbereich. Im Bereich III, ab $N = 10^8$ Schwingspielen, reicht die Belastung für ein Versagen von der Oberfläche nicht mehr aus. Versetzungswanderungen und Versetzungskonzentrationen um innere Einschlüsse führen über die lange Belastungsdauer zur Rissinitiierung an inneren Einschlüssen, sodass es zum Wechsel des Versagensmechanismus kommt. Für den Bereich IV ist noch nicht abschließend geklärt, ob eine Dauerfestigkeit für das Versagen an inneren Defekten tatsächlich besteht.

Neben den von [Mugh06] beschriebenen Verläufen der Wöhlerlinie für Typ I und Typ II Werkstoffe sind für technische Werkstoffe weitere Verläufe von Wöhlerlinien bekannt. Je nach Werkstoffgruppe können charakteristische Verläufe der einzelnen Wöhlerlinien aufgestellt werden, Abbildung 2.18.

Für niedrigfeste Baustähle und starkgekerbte Proben ergibt sich dabei der klassische Verlauf der Wöhlerlinie mit einem konstanten Abfall der Schwingfestigkeit im Bereich der Zeitfestigkeit und einem Plateau im Bereich der Langzeitfestigkeit, Abbildung 2.18 a. Für kubisch flächenzentrierte Werkstoffe oder Werkstoffe, die korrosiven Medien ausgesetzt sind, kommt es nach der konstanten Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden nach dem Abknickpunkt zu einem weiteren flacheren Abfall im Bereich der Langzeitfestigkeit und des VHCF-Bereichs, Abbildung 2.18 b. Für einige höherfeste und höchstfeste Stähle lässt sich kein Abknickpunkt der Zeitfestigkeitsgeraden definieren und die Neigung der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeits- und VHCF-Bereich wird mit der Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden weitergeführt, Abbildung 2.18 c.

Für Aluminiumlegierungen, die ein kubisch flächenzentriertes Kristallgitter besitzen, ist ein weiterer Abfall der Schwingfestigkeit nach dem Abknickpunkt allgemein anerkannt und belegt [Oste07]. Ein Versagen in Form von „fisheye“-Strukturen, das heißt an inneren Defekten, wird jedoch seltener beobachtet. Bei ausscheidungshärtbaren AlMgSi-Aluminiumlegierungen wird entweder ein Versagen von der Oberfläche [Schw07, Schw11] oder ein „non-defect“ Versagen,

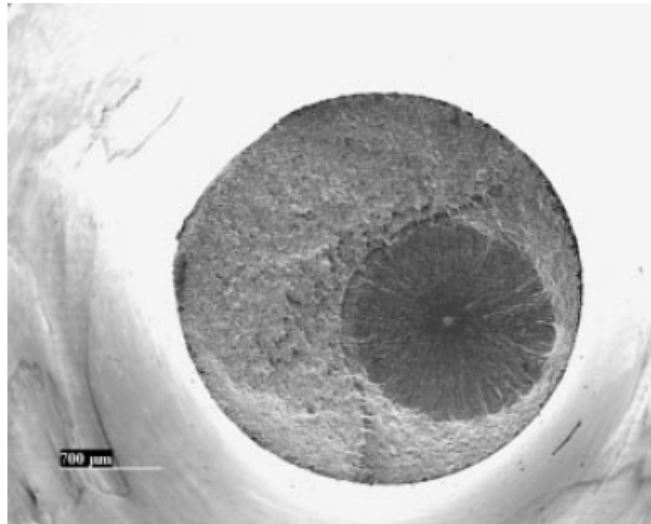


Abbildung 2.16.: Fisheye Rissausgang in einem hochfesten Stahl [Bath99]

bei dem der Rissausgang nicht gefunden werden kann [Bach14], beobachtet. Vereinzelt werden auch überdurchschnittlich große Körner als Rissausgang vermutet [Schw11]. In weiteren Untersuchungen konnten diese jedoch nicht als Rissursache bestätigt werden. Aufwendige Untersuchungen mit Focused-Ion-Beam-Mikroskopen (FIB) und Electron backscatter diffraction (EBSD) konnten weder einen Zusammenhang mit ähnlich orientierten Körnern in der Umgebung des vermuteten Rissausgangs auffinden noch Einschlüsse als Rissursache ausmachen. Stattdessen wird eine unglückliche Anordnung von Legierungselementen als Rissausgang vermutet [Bach14].

2.5.4 Dehnungsgeregelte Versuche

Unter zyklischer Belastung kann sich das Spannungs-Dehnungsverhalten eines Werkstoffes während der Lebensdauer verändern. Ver- oder Entfestigungsvorgänge im Werkstoff können beobachtet werden, die als transientes Werkstoffverhalten bezeichnet werden. Nach den ersten Schwingspielen gehen diese Veränderungen des Spannungs-Dehnungsverhaltens bei zyklischer Beanspruchung mit konstanten Dehnungsamplituden in ein stabilisiertes Werkstoffverhalten über. Im Bereich dieses stabilisierten Zustandes verändert sich das Spannungs-Dehnungsverhalten nicht mehr über die Lebensdauer, sodass der stabilisierte Bereich als Grundlage für die Ermittlung der dehnungsgeregelten Kennwerte benutzt wird. Im Gegensatz zu Kennwerten aus spannungsgeregelten Wöhlerversuchen gehen diese Veränderungen im Spannungs-Dehnungsverhalten bei zyklischer Belastung bei dehnungsgeregelten Wöhlerversuchen nicht verloren und können als zusätzliche Information genutzt werden.

Diese zyklischen Kennwerte bilden die Grundlage für eine Lebensdauerabschätzung nach dem örtlichen Konzept. Demnach ist eine Abschätzung der Lebensdauer schon in der Konstruktionsphase eines Bauteils ohne eine Bauteilwöhlerlinie möglich und kann auch dann angewendet werden, wenn keine Nennspannungen definiert werden können.

Als Grundlage der Ermittlung der zyklischen Werkstoffkennwerte dienen dehnungsgeregelte Versuche an Werkstoffproben, an denen für die Dehnungsregelung ein Dehnungsaufnehmer angebracht wird, vgl. Abbildung 5.1.

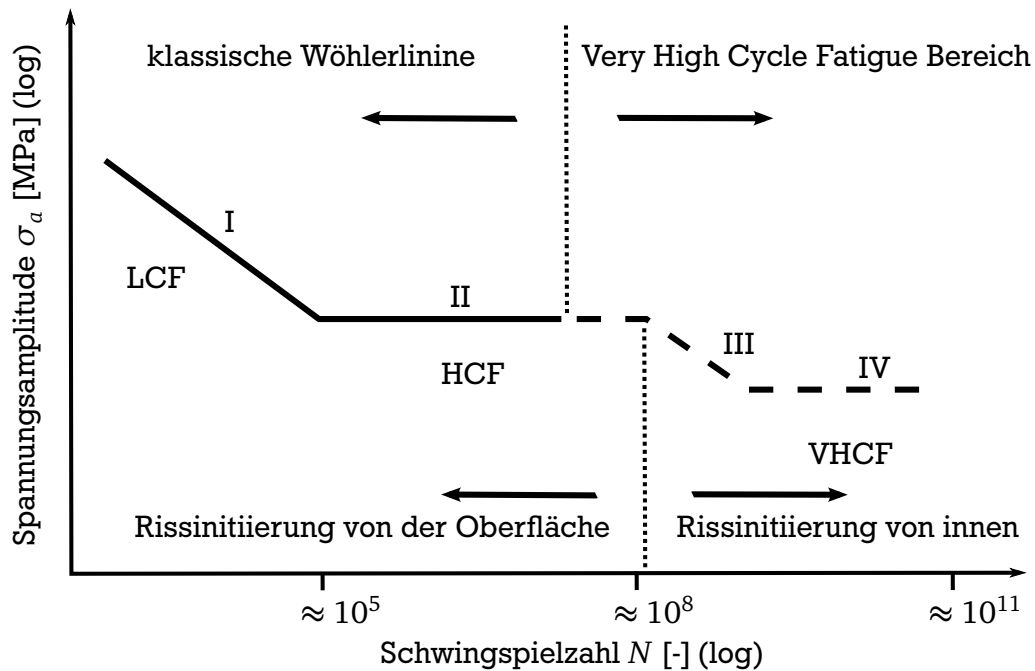


Abbildung 2.17.: Schematische Wöhlerlinie für Werkstoffe vom Typ II (hochfeste, metallische Werkstoffe) nach [Mugh06]

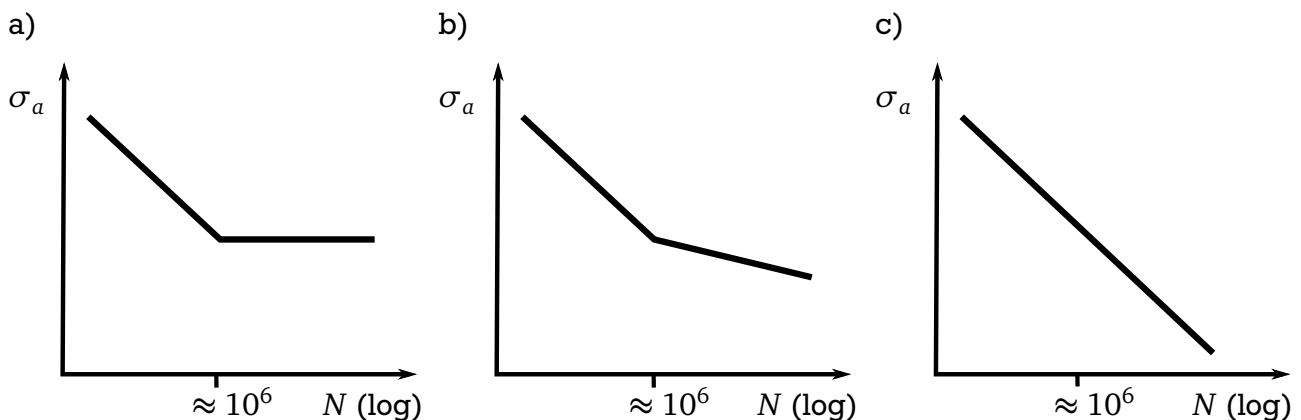


Abbildung 2.18.: Wöhlerlinien weiterer technischer Werkstoffe: a) niedrigfeste Baustähle und starkgekerbte Proben b) kubisch flächenzentrierte Werkstoffe oder überlagerte Korrosion c) höherfeste und höchstfeste Stähle nach [Berg08]

Um die Ver- oder Entfestigungsvorgänge im Werkstoff erfassen zu können, werden zusätzlich zum vorgegebenen Dehnungsverlauf der Spannungsverlauf bzw. die sich ändernde Spannung mit aufgezeichnet. Je nach dem, ob die Spannung bei konstanter Dehnungsamplitude zu- oder abnimmt, kann dies als zyklisches Ver- oder Entfestigungsverhalten quantifiziert werden. Da die transienten Werkstoffeffekte besonders stark in Folge von hohen plastischen Dehnungsanteilen zu beobachten sind, werden diese Versuche prinzipiell im Kurzzeitfestigkeitsbereich, auch Low Cycle Fatigue (LCF) Bereich genannt, durchgeführt. Anrisskriterium des dehnungsgeregelten Versuchs ist die Anrisschwingspielzahl N_A , die bei 10 % Änderung der Maxima der Spannungs-

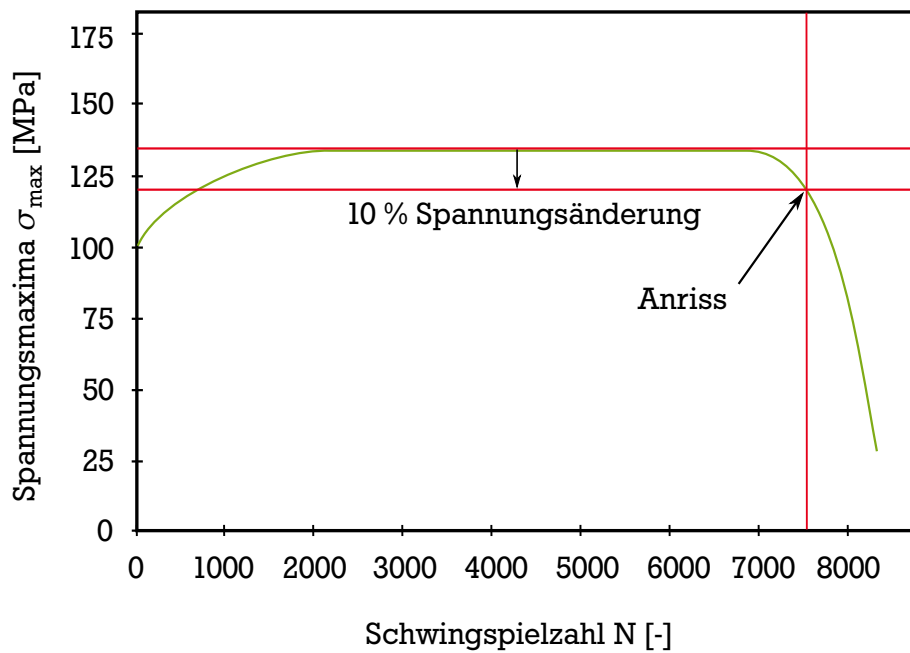


Abbildung 2.19.: Anrisskriterium der dehnungsgeregelten Versuche: Änderung der Spannungsmaxima um 10 % im Vergleich zu den Spannungsmaxima im Bereich des stabilisierten Werkstoffverhaltens

amplitude vom Bereich des stabilisierten Werkstoffverhaltens ermittelt wird (Abbildung 2.19). Da die transienten Werkstoffeffekte in der Regel in den ersten Schwingspielen auftreten und sich hiernach ein Bereich des stabilisierten Werkstoffverhaltens einstellt, wird die Auswertung bei ca. 50 % der Anrisschwingspielzahl durchgeführt. Bei sehr stark transientem Werkstoffverhalten kann sich dieser Bereich jedoch auch zu längeren Schwingspielzahlen verschieben.

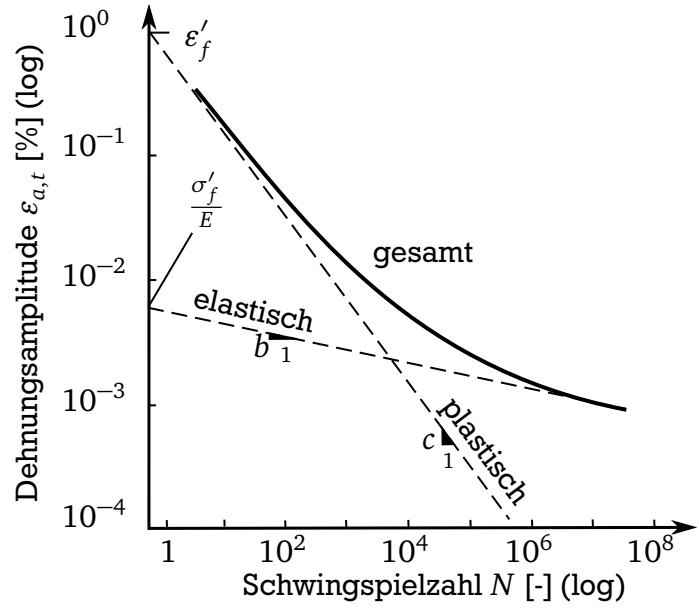
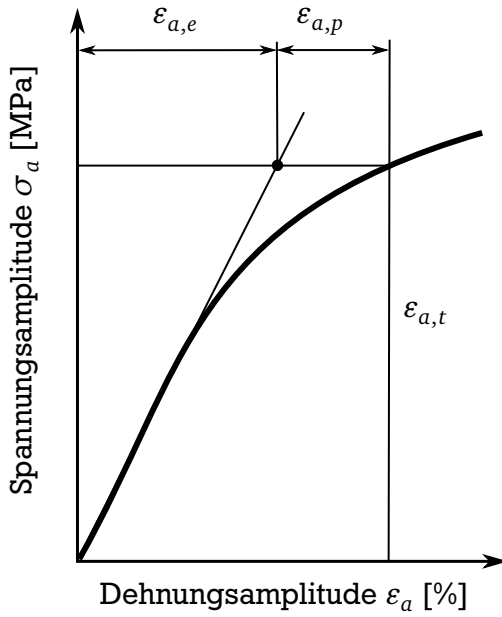
Die Auswertung der dehnungsgeregelten Versuche erfolgt in zwei Schritten. Zum einen wird die zyklische Spannungs-Dehnungskurve (Abbildung 2.20 a) zum anderen die Dehnungswöhlerlinie aus den Ergebnissen abgeleitet (Abbildung 2.20 b).

Die Dehnungswöhlerlinie wird nach COFFIN, MANSON und BASQUIN [Coff43, Mans65, Basq10] dargestellt (Gleichung 2.20).

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^b + \varepsilon'_f \cdot (2 \cdot N_A)^c \quad (2.20)$$

Ausgangspunkt für die Auswertung ist die stabilisierte Hysterese aus Spannung und Dehnung, Abbildung 2.21, die im Bereich des stabilisierten Werkstoffverhaltens bei $N = \frac{1}{2} \cdot N_a$ ausgewertet wird. Die elastischen Dehnungsanteile $\varepsilon_{a,e}$ und die plastischen Dehnungsanteile $\varepsilon_{a,p}$ der stabilisierten Hysterese werden für jeden Versuch ausgewertet. Während sich die elastischen Dehnungsanteile nach dem HOOKE'schen Gesetz (Gleichung 2.1) berechnen lassen, werden die plastischen Dehnungsanteile aus der Differenz der Gesamtdehnung $\varepsilon_{a,t}$ und der elastischen Dehnung mit Gleichung 2.21 beschrieben.

$$\varepsilon_{a,p} = \varepsilon_{a,t} - \varepsilon_{a,e} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_{a,e} = \frac{\sigma_a}{E} \quad (2.21)$$



(a) Zyklische Spannungs-Dehnungskurve [Ramb43]

(b) Elastische, plastische und Gesamtdehnungswöhlerlinie [Coff43, Mans65, Basq10]

Abbildung 2.20.: Zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Dehnungswöhlerlinie [Haib02]

In Anhängigkeit von der Schwingspielzahl lassen sich die elastischen und plastischen Dehnungsanteile im doppeltlogarithmischen Diagramm jeweils durch eine Regressiongerade approximieren und so eine elastische und eine plastische Dehnungswöhlerlinie aufstellen. Die Dehnungswöhlerlinie für die elastischen Dehnungsanteile wird durch den Schwingfestigkeitskoeffizienten σ'_f und die Neigung durch den zyklischen Schwingfestigkeitsexponenten b definiert [Basq10]. Die plastische Dehnungswöhlerlinie wird nach [Coff43] und [Mans65] durch den Duktilitätskoeffizienten ϵ'_f und die Neigung durch den zyklischen Duktilitätsexponenten c beschrieben. Die Gesamtdehnungswöhlerlinie (Gleichung 2.20) ergibt sich aus der Superposition der elastischen und der plastischen Dehnungswöhlerlinie.

Die zyklische Spannungs-Dehnungskurve wird nach RAMBERG und OSGOOD [Ramb43] (Gleichung 2.22) beschrieben.

$$\epsilon_{a,t} = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (2.22)$$

Wie bei der Dehnungswöhlerlinie werden die elastischen und plastischen Dehnungsanteile separat zur Gesamtdehnung addiert. Der elastische Anteil $\epsilon_{a,e}$ folgt dabei dem HOOKE'schen Gesetz (Gleichung 2.1). Die plastischen Dehnungsanteile werden in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude mit einer Regression im doppeltlogarithmischen Koordinatensystem zu einer Geraden approximiert. Der zyklische Festigkeitskoeffizient K' entspricht der theoretischen Spannung bei einer theoretischen plastischen Dehnung von 100 %. Die Steigung der Geraden wird durch den zyklischen Verfestigungsexponenten n' beschrieben. Durch die Addition des elastischen und des plastischen Dehnungsanteils entsteht die zyklische Spannungs-Dehnungskurve, die im linea-

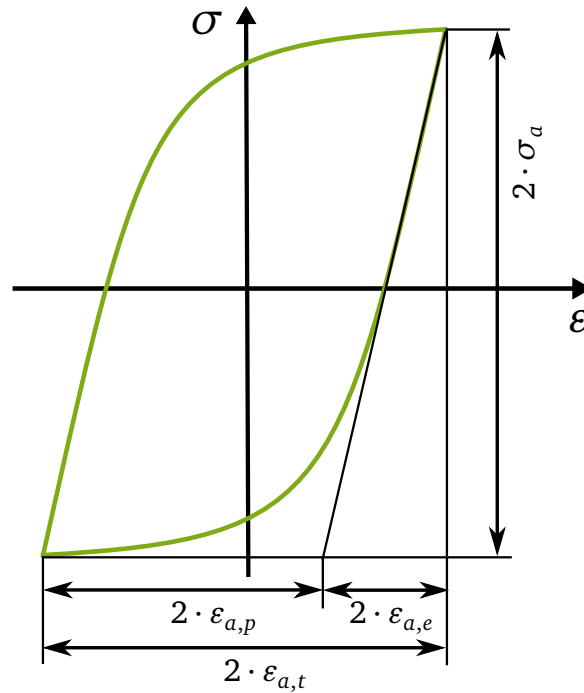


Abbildung 2.21.: Aufteilung der stabilisierten Hysterese in die elastischen und plastischen Dehnungsanteile

ren Koordinatensystem dargestellt wird. Mit Hilfe der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve lässt sich das zyklische Ver- oder Entfestigungsverhalten darstellen. Hierzu wird die zyklische Spannungs-Dehnungskurve zusammen mit der Erstbelastungskurve, die der statischen Spannungs-Dehnungskurve aus dem Zugversuch entspricht, aufgetragen. Verläuft die zyklische Spannungs-Dehnungskurve oberhalb der Erstbelastungskurve hat sich durch zyklisch transiente Werkstoffeffekte eine Verfestigung bis zum Erreichen des stabilisierten Werkstoffzustands eingestellt. Verläuft die zyklische Spannungs-Dehnungskurve unterhalb der Erstbelastungskurve lässt das auf eine zyklische Entfestigung des Werkstoffes schließen.

Durch die Kompatibilitätsbedingungen (Gleichungen 2.23 und 2.24) lassen sich aus den Parametern der Dehnungswöhlerlinie (Gleichung 2.20) die Kennwerte für die zyklische Spannungs-Dehnungskurve nach RAMBERG und OSGOOD und das damit verbundene plastische Werkstoffverhalten ableiten.

$$n' = \frac{b}{c} \quad (2.23)$$

$$K' = \frac{\sigma_f'}{(\epsilon_f')^{n'}} \quad (2.24)$$

2.5.5 Modifikation der Dehnungswöhlerlinien in den Langzeitfestigkeitsbereich

Die Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN, MANSON und BASQUIN basieren auf Versuchen an Stählen und Kupfer mit Versagen bei größtenteils weniger als 10^4 Schwingspielen. Lineares Verhalten der elastischen und plastischen Dehnungsanteile in Abhängigkeit von deren Lebensdauern im doppeltlogarithmischen System werden dabei vorausgesetzt. MANSON wies darauf hin, dass eine Übertragung des Konzeptes auf Aluminiumlegierungen nicht ohne weiteres möglich sei [Mans65]. Viele Wissenschaftler bestätigen die Aussage und finden ein Abknicken der Regressionsgerade der elastischen Dehnungsanteile (Abbildung 2.22) [Endo69, Sand77, Wong84, Step88, Fate05, Wage07].

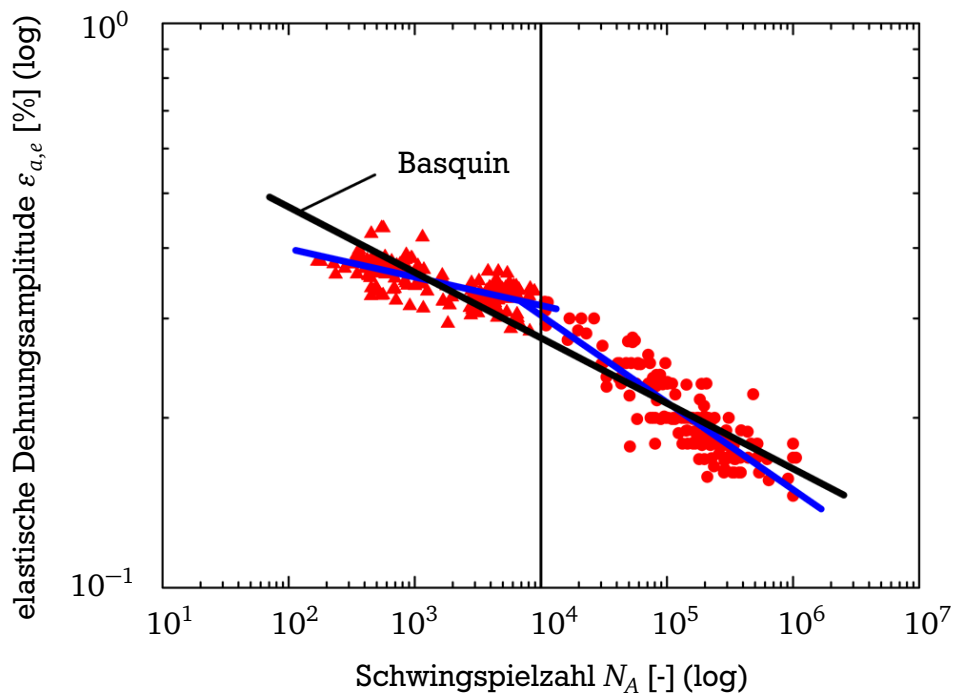


Abbildung 2.22.: Abknicken der elastischen Dehnungsanteile [Wage07]. Schwarze Gerade: Regressionsgerade der elastischen Dehnungsanteile nach Basquin; blaue Geraden: Bi-lineare Auswertung der Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile

Dieses Abknicken der elastischen Dehnungsanteile wird besonders bei Aluminiumlegierungen beobachtet, die ein stark verfestigendes zyklisches Werkstoffverhalten zeigen. In [Fate05] wird ein bi-linearer Ansatz zur Beschreibung der Dehnungswöhlerlinie vorgestellt, der das Abknicken der Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile bei $N_A = 1 \cdot 10^4$ Schwingspielen annimmt. Dabei werden für die Ableitung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve nur die elastischen und plastischen Dehnungsanteile im ersten Bereich der Dehnungswöhlerlinie verwendet, was zu einer besseren Abbildung der Versuchspunkte im Bereich hoher Dehnungen in der Spannungs-Dehnungskurve führt.

In der Dehnungswöhlerlinie stellt sich durch die Unterteilung der elastischen Anteile in zwei Bereiche im Bereich hoher Dehnungen ein flacherer Verlauf ein, der im zweiten Bereich deutlich steiler ist. Im bi-linearen Ansatz wird jedoch kein weiteres Abknicken zu einem flacheren Verlauf der Dehnungswöhlerlinie bei hohen Schwingspielzahlen berücksichtigt, wie dies von den Spannungswöhlerlinien bekannt ist. Dies führt im Bereich sehr hoher Schwingspielzahlen zu einer deutlichen Unterschätzung der Schwingfestigkeit.

Um das Werkstoffpotential auch bei höheren Schwingspielzahlen besser abbilden zu können, wird der bi-lineare Ansatz in [Wage07, Wage08] zu einem tri-linearen Ansatz weiterentwickelt, der drei Bereiche je nach transientem Verhalten der Hysterese vorsieht:

- Im ersten Bereich (Abbildung 2.23 Bereich 1) ist das Werkstoffverhalten über die gesamte Lebensdauer elastisch-plastisch. Die Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN (Kapitel 2.5.4) unter Verwendung der Kompatibilitätsbedingungen führt zu einer guten Beschreibung der Dehnungswöhlerlinie und der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve.
- Im zweiten Bereich (Abbildung 2.23 Bereich 2) wechselt das Werkstoffverhalten während der zyklischen Beanspruchung. Der Werkstoff verfestigt aufgrund der plastischen Dehnungsanteile bis zu einem Punkt an dem nur noch makroskopisch elastisches Werkstoffverhalten vorhanden ist. Dies führt zu einem steilen Abfall der Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile, da die Verfestigung in diesem Bereich je nach Lasthorizont verschieden stark ausgebildet ist.
- Im dritten Bereich (Abbildung 2.23 Bereich 3) ist über die gesamte Lebensdauer nur makroskopisch elastisches Werkstoffverhalten zu beobachten.

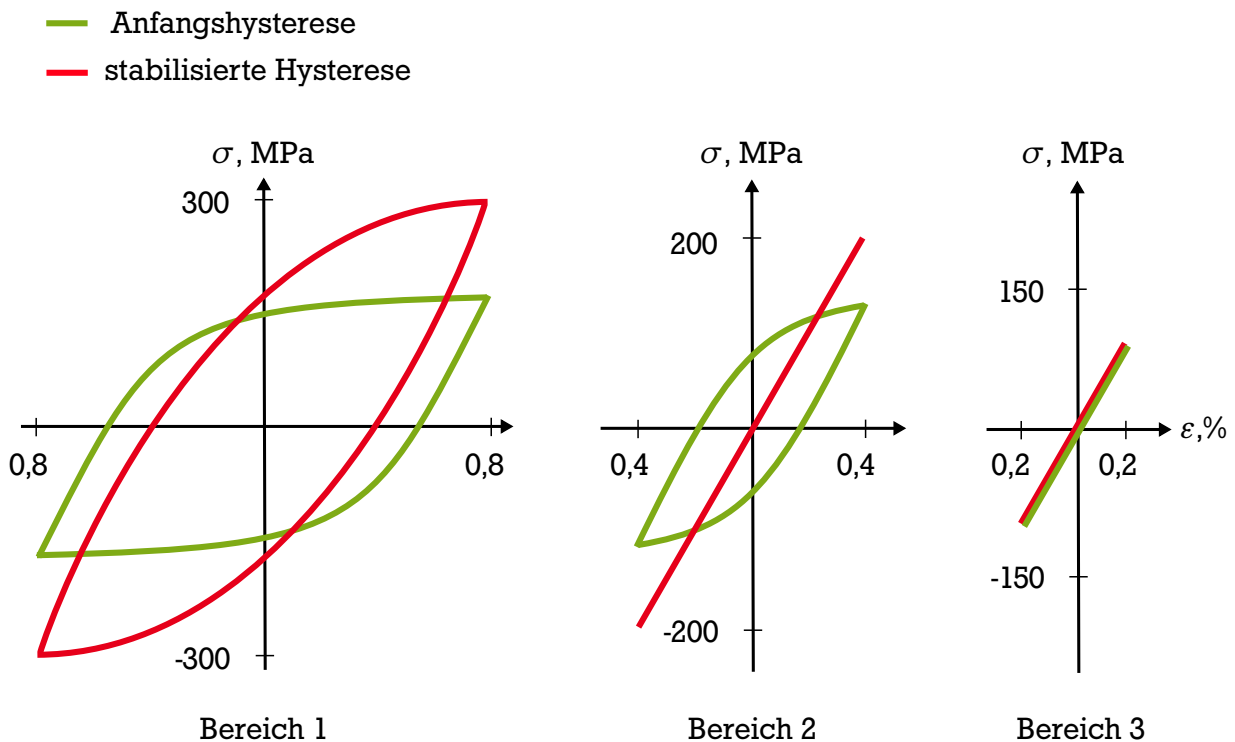


Abbildung 2.23.: Vergleich der Spannungs-Dehnungshysterese nach [Wage07]

Die Einteilung in diese drei Bereiche führt einem charakteristischen Verlauf der Dehnungswöhlerlinie, die im ersten Bereich flach, im zweiten Bereich steil und im dritten Bereich wieder flacher verläuft. Der Verlauf deckt sich ebenfalls mit den Erfahrungen der Ausprägung der Wöhlerlinie bei der Auswertung der spannungsgeregelten Versuche.

Die Auswertung der Bereiche der dehnungsgeregelten Versuche wird über Gleichung 2.25 realisiert, in der die drei Bereiche (Index $i = 1, 2, 3$) berücksichtigt werden:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,e} + \varepsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_{f_i}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_i} + \varepsilon'_f (2 \cdot N_A)^c \quad (2.25)$$

Die Übergangsbedingung zwischen den Bereichen 1 und 2 wird in Gleichung 2.26 dargestellt.

$$\frac{\sigma'_{f_1}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_1} \leq \frac{\sigma'_{f_2}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_2} \quad (2.26)$$

Für den Bereich 3, in dem das Werkstoffverhalten makroskopisch elastisch ist, ist die Neigung der Dehnungswöhlerlinie noch nicht vollständig geklärt. Selbst für die spannungsgeregelt aufgenommenen Wöhlerlinien werden neben der Weiterführung der Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden, ein waagerechtes Abknicken der Wöhlerlinie [Kamm02] aber auch eine einheitliche Neigung von $k^* = 22$ für alle Aluminiumlegierungen vorgeschlagen [Sons05, Sons07].

Um eine Lebensdauerabschätzung anhand der Dehnungswöhlerlinie auch bis in den Langzeitfestigkeitsbereich hinein vornehmen zu können, wird der dritte Bereich im tri-linearen Ansatz wie folgt betrachtet (Gleichung 2.27):

$$\frac{\sigma'_{f_2}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_2} \leq \frac{\sigma'_{f_3}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_3} \quad (2.27)$$

Für den weiteren Verlauf werden in [Wage07] aufgrund von fehlenden Versuchsergebnissen bei hohen Schwingspielzahlen in Anlehnung an die lineare Schadensakkumulation nach PALMGREN-MINER drei Variationen vorgeschlagen.

- **Original** Die Neigung b_3 ist gleich mit der Neigung der elastischen Geraden aus dem ersten Abschnitt. $b_3 = b_1$
- **Elementar** Die Neigung b_3 entspricht der Neigung der elastischen Geraden aus dem zweiten Abschnitt. $b_3 = b_2$
- **Haibach** Die Neigung b_3 wird aus der Neigung b_2 der elastischen Geraden aus dem zweiten Abschnitt analog zur Miner-Modifikation nach HAIBACH [Haib02] $k^* = 2 \cdot k - 1$ berechnet. Da die Neigung k proportional zum Reziprokwert des Schwingfestigkeitskoeffizienten b ist, ergibt sich für die Neigung $b_3 = \frac{1}{\frac{2}{b_2} + 1}$

Eine Empfehlung, welche der Modifikationen für bestimmte Aluminiumlegierungen anzuwenden ist, wird in [Wage07] nicht gegeben. Für die Schädigungsbewertung von kleinen Amplituden muss die Neigung im dritten Bereich deshalb experimentell ermittelt werden.

Die Ableitung der Parameter zur Beschreibung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve erfolgt anhand der Kennwerte aus dem ersten Bereich der Dehnungswöhlerlinie, da diese das zyklisch elastisch-plastische Werkstoffverhalten beschreiben [Fate05, Wage07]. Die Berechnung der Koeffizienten der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve nach dem tri-linearen Ansatz sind in Gleichung 2.28 und 2.29 dargestellt.

$$n' = \frac{b_1}{c} \quad (2.28)$$

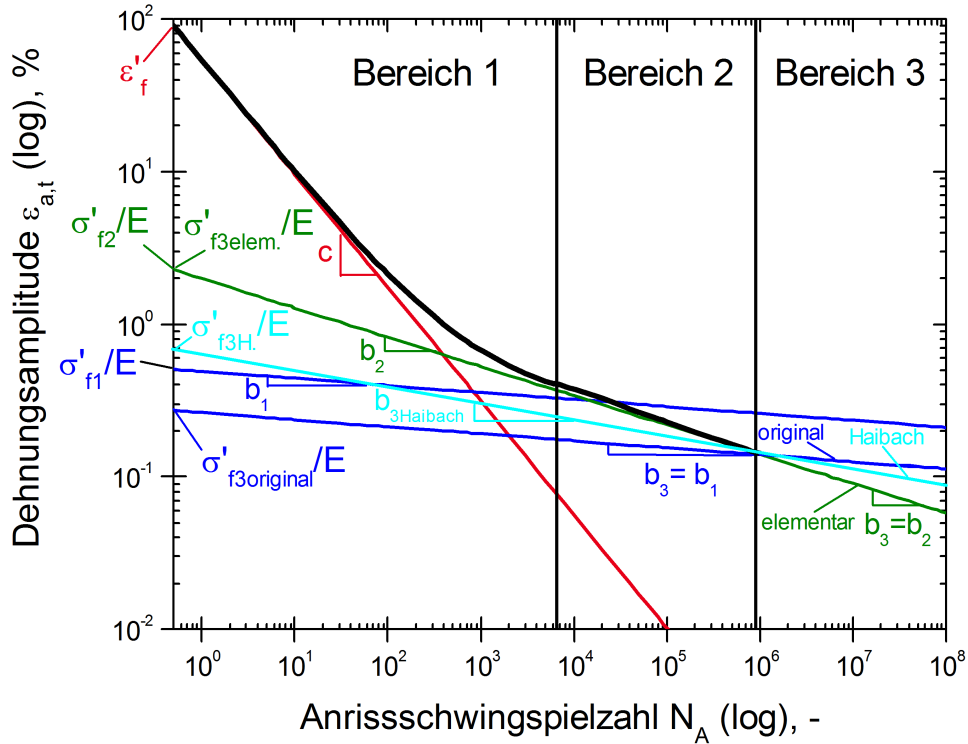


Abbildung 2.24.: Schematische Darstellung der Dehnungswöhlerlinie nach [Wage07]

$$K' = \frac{\sigma'_{f1}}{(\varepsilon'_f)^{n'}} \quad (2.29)$$

Die Auswertung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve nach dem tri-linearen Ansatz führt zu einer deutlich besseren Abbildung der Versuchspunkte bei Aluminiumlegierungen verglichen zur Auswertung aus den Parametern nach COFFIN, MANSON und BASQUIN, Abbildung 2.25.

Ein weiterer Ansatz zur Bewertung der Dehnungswöhlerlinie bei hohen Schwingenspielzahlen wird in [Klee73] entwickelt. Auf Basis von dehnungsgeregelten Versuchen an sieben Werkstoffen wird ein Abknicken in der Ausgleichgeraden durch die plastischen Dehnungsanteile gezeigt. Je nach Werkstoff kommt es zu einem steileren oder flacheren Verlauf der plastischen Dehnungswöhlerlinie, Abbildung 2.26.

Um dieses Verhalten abbilden zu können, wird der Gleichung für die plastische Dehnungswöhlerlinie für $N > 10^4$ ein werkstoffabhängiger Korrekturwert ε_L hinzugefügt, der für positive Werte ein Abflachen und für negative Werte ein stärkeres Abfallen der plastischen Dehnungswöhlerlinie für $N > 10^4$ bewirkt. Das Verhalten von Aluminiumlegierungen wird in [Klee73] jedoch nicht betrachtet.

$$\varepsilon_{a,p} = \varepsilon'_f \cdot (2 \cdot N_A)^c + \varepsilon_L \quad (\text{für } N > 10^4) \quad (2.30)$$

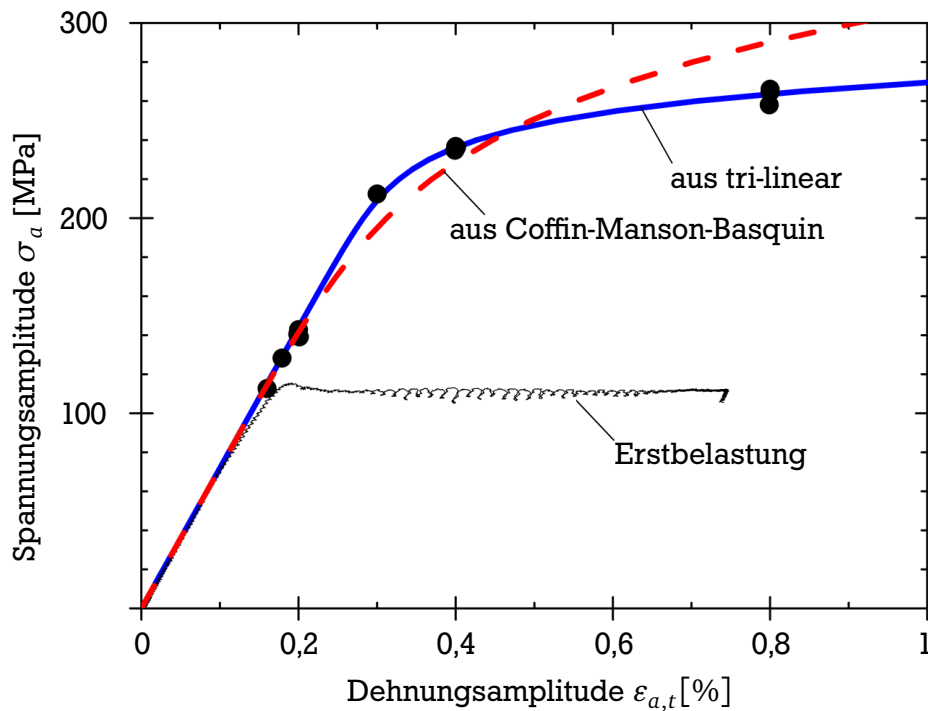


Abbildung 2.25.: Zyklische Spannungs-Dehnungskurve für eine Aluminiumlegierung nach [Wage07] mittels Kompatibilität aus den Parametern der Dehnungswöhlerlinie abgeleitet

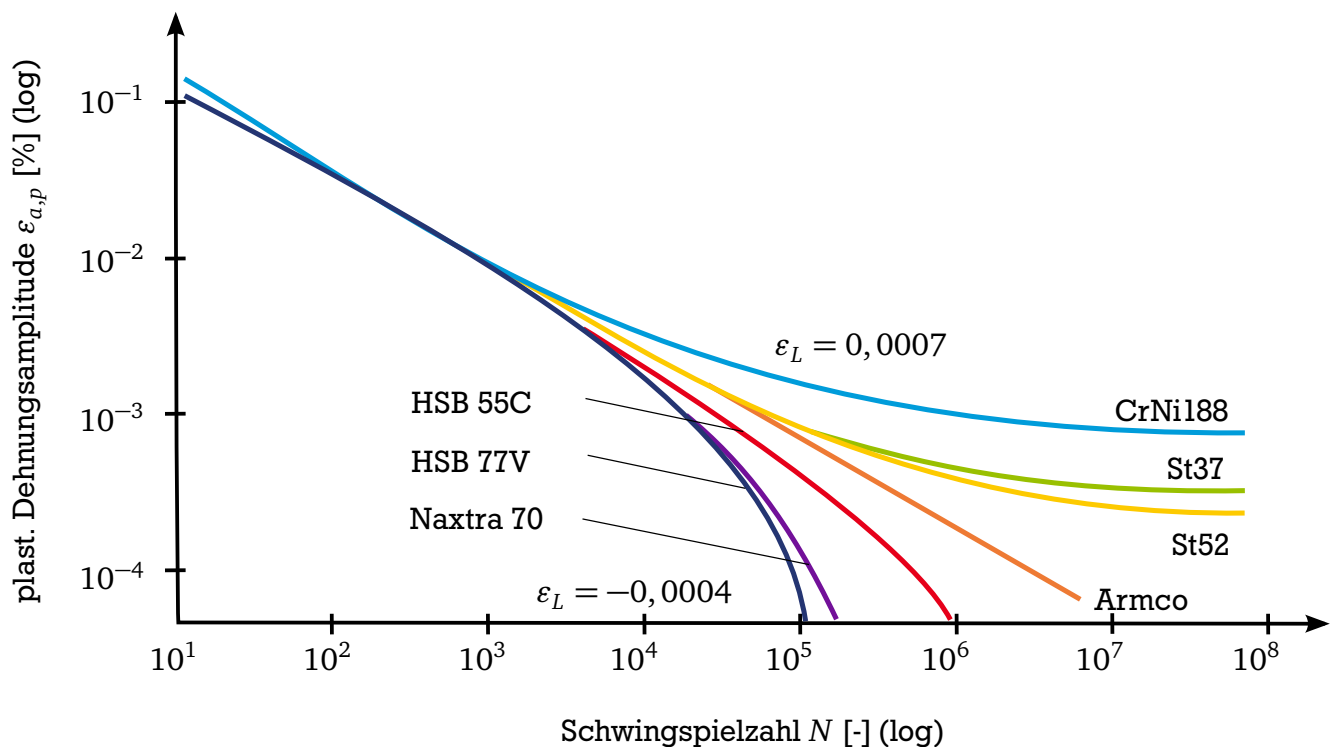


Abbildung 2.26.: Vergleich des Verlaufs der plastischen Dehnungswöhlerlinie für sieben verschiedene Werkstoffe nach [Klee73]

2.6 Frequenzeinfluss

Um Schwingfestigkeitskennwerte im Labor in einem möglichst kurzen Zeitraum experimentell zu bestimmen, wird eine möglichst hohe Versuchsfrequenz angestrebt. Dabei müssen zeitabhängige Einflüsse auf das Werkstoffverhalten ausgeschlossen werden, die eine Veränderung des Werkstoffes verursachen und somit die Schädigung beeinflussen. Dies wäre z.B. eine starke Erwärmung der Probe oder Korrosion.

Bei der Versuchszeitverkürzung ist darauf zu achten, dass schädigungsäquivalente Prüfbedingungen eingehalten werden. Daher wurde in [Baue13] für die Beanspruchung von Fahrwerksteilen unter mechanischer und korrosiver Belastung ein Ersatzmedium entwickelt, das eine Versuchszeitverkürzung unter zyklischer Beanspruchung mit Korrosion ermöglicht und dabei feldrelevante Schädigungsmechanismen nachbilden kann.

In den meisten Schwingfestigkeitsprüfungen mit Versuchszeitverkürzung durch Frequenzerhöhung werden jedoch keine korrosiven Medien dem Versuch überlagert. Vielmehr kommt die Eigenerwärmung der Probe zum Tragen. Die eingebrachte mechanische Energie, die bei erhöhter Versuchsfrequenz in einer viel kürzeren Zeit in der Probe umgesetzt wird, führt zu einer Erwärmung der Probe, die je nach Prüffrequenz nicht schnell genug abgeführt werden kann. Da sich die Werkstoffstruktur je nach Temperatur ändern kann, ist die Probentemperatur stets deutlich unterhalb der Temperatur zu halten, bei der Umwandlungs- oder starke Diffusionsvorgänge im Werkstoff ausgelöst werden.

Welche Grenztemperatur für eine Prüfung noch zugelassen werden darf, hängt von der Werkstoffstruktur und der Temperaturempfindlichkeit des Werkstoffes ab. Für aushärtbare AlSiMg-Aluminiumknetlegierungen kann diese Grenztemperatur schon bei unter 100° C liegen.

Einer zyklischen Erwärmung der Probe kann durch Kühlen entgegengewirkt werden. Hierfür wird entweder das Kühlen der Werkstoffprobe mit Druckluft oder das verwenden von Puls/Pause-Zyklen verwendet. Beim Kühlen der Probe mit Druckluft wird die Wärme durch Konvektion abgeführt. Dabei wird jedoch nur die Oberfläche der Probe gekühlt. Eventuelle lokale Temperaturerhöhungen an Einschlüssen oder anderen inneren Kerben können dabei nicht ausgeschlossen werden. Ein Abkühlen durch Puls/Pause-Zyklen wird erreicht, indem der Versuch bei Erreichen einer kritischen Probenoberflächentemperatur gestoppt und nach einer Abkühlphase wieder neu gestartet wird. Ein Nachteil von Puls/Pause-Zyklen ist, dass immer wieder neu an- bzw. ausgeschwungen werden muss. Die so aufgebrachten Zyklen werden jedoch erst ab einer Amplitudenhöhe von 90% der Soll-Amplitude gewertet und so eine nicht definierte Anzahl an Zyklen zusätzlich auf die Probe aufgebracht.

Doch selbst wenn die oben genannten Einflüsse ausgeschlossen werden können, wird bei Prüfungen bei Raumtemperatur und Umgebungsluft ein Einfluss der Prüffrequenz auf die Lebensdauer beobachtet. In Standardwerken wird der Frequenzeinfluss jedoch nur oberflächlich behandelt. So wird der Frequenzeinfluss in [Rada07] für Stähle bei Frequenzen von $1 \leq f \leq 10^3$ Hz auf Grundlage von Untersuchungen an Nietverbindungen im Bereich von $1 \leq f \leq 30$ Hz [LBF 79] für vernachlässigbar dargestellt und für Leichtmetalle mit einem zunehmenden Widerstand gegen Versetzungsbewegungen erklärt [Rada07].

In der aktuellen Forschung wird dies differenzierter betrachtet. Zwei Mechanismen werden diskutiert, mit denen der Frequenzeinfluss erklärt werden soll. Zum einen werden die Dehnraten zum anderen eine korrosive Wirkung der Umgebungsluft für den Frequenzeinfluss verantwortlich gemacht.

2.6.1 Dehnrateneinfluss

Die Dehngeschwindigkeit bzw. Dehnrates $\dot{\varepsilon}$ bezeichnet die Geschwindigkeit, mit der ein Werkstoff gedehnt wird. Hohe Versuchsfrequenzen verursachen höhere Dehnraten im Werkstoff als niedrige Versuchsfrequenzen. Untersuchungen mit konstanten Dehnraten sind z.B. Zugversuche oder zyklische Belastungen in dehnungsgeregelten Versuchen mit dreieckförmigen Belastungssignalen.

Für reines Aluminium zeigt sich bei dehnungsgeregelten zyklischen Versuchen mit dreieckförmigem Signal eine starke Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Dehngeschwindigkeit [Wiel75]. Aufgrund von begleitenden kinematographischen Messungen, wird das Werkstoffverhalten auf die Anzahl und die Geschwindigkeit der Versetzungen und somit auch das Verhalten unter verschiedenen Belastungsfrequenzen auf die Dehngeschwindigkeit zurückgeführt.

Spannungsgeregelte Versuche mit sinusförmigen Belastungssignalen haben dagegen einen variablen Verlauf der Dehnraten. Gerade bei Belastungen mit dem Spannungsverhältnis $R = -1$ entstehen die höchste Dehnrates im Bereich der Entlastung (Nulldurchgang des Lastverlaufes) und die geringste Dehnrates im Bereich der höchsten Belastung (Umkehrpunkte des Lastverlaufes), sodass der Einfluss der Dehnrates bei sinusförmiger Belastung geringer eingeschätzt werden kann, Abbildung 2.27.

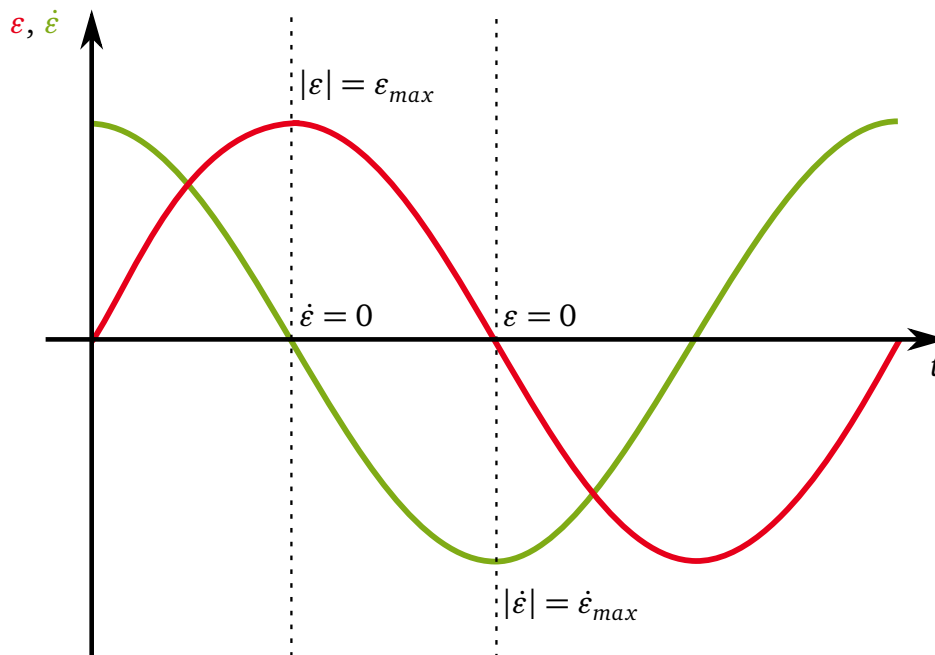


Abbildung 2.27.: Zeitliche Abhängigkeit von Dehnung ε und Dehnrates $\dot{\varepsilon}$ bei sinusförmiger Belastung

Einen erheblichen Einfluss auf die Dehnratenabhängigkeit soll die Gitterstruktur haben, [Lair82]. Während bei Materialien mit kubischflächenzentrierter (kfz) Gitterstruktur, sowohl bei reinen Materialien als auch bei Legierungen, die Dehnrates nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Lebensdauer haben, kann der Einfluss auf Materialien mit kubischraumzentrierter (krz) Gitterstruktur erheblich sein. Bestätigt wird dies für Stähle und Aluminiumlegierungen unter anderem von [Schn14].

2.6.2 Umgebungseinfluss der Luft

Obwohl Aluminium und Aluminiumlegierungen unter statischen Bedingungen sehr gute Korrosionseigenschaften haben, werden unter zyklischer Belastung Einflüsse der Umgebungsluft auf die Schwingfestigkeit von Aluminiumlegierungen beobachtet.

Die Vermutung, dass der Frequenzeinfluss bei Aluminium auf die korrosive Wirkung der Umgebungsluft zurückzuführen ist, wurde schon in den 50er Jahren aufgestellt. 1958 wurden in [Step58, Harr59] Versuchsergebnisse vorgestellt, die den Einfluss der Versuchsfrequenz auf verschiedene Werkstoffe beschreiben. Duraluminium, eine Vorstufe der heutigen 2xxx AlCu-Aluminiumlegierungen, zeigt dabei im Vakuum im Vergleich zur Umgebungsluft einen Anstieg der Schwingfestigkeit um 6 % bei gleicher Versuchsfrequenz. Für die AlCu-Aluminiumlegierung RR.56 ist eine Steigerung der Schwingfestigkeit mit Steigerung der Versuchsfrequenz um 13 % an Luft deutlich zu erkennen. Bei reinem Aluminium beträgt die Steigerung der Schwingfestigkeit sogar 25 %. Die in der Studie verwendeten Versuchsfrequenzen sind in der Studie [Step58, Harr59] jedoch nicht angegeben.

Tabelle 2.7.: Vergleich der Schwingfestigkeiten von Aluminium bei Umgebungsluft und Vakuum [Step58, Harr59]

Effekt beim Frequenzanstieg		Effekt beim Testen im Vakuum	
Material	Verhältnis F_1/F_2	Material	Verhältnis F_v/F_l
Aluminium	1,25		
Aluminium (RR.56)	1,13	Duraluminium	1,06

mit

F_1 = Schwingfestigkeit bei hohen Frequenzen

F_v = Schwingfestigkeit im Vakuum

F_2 = Schwingfestigkeit bei niedrigen Frequenzen

F_l = Schwingfestigkeit an Luft

Mit Druckluft angeregte Biegeproben waren Gegenstand der Untersuchung von [Harr59, Harr61]. Der Aufbau ermöglicht Prüffrequenzen zwischen 10 Hz und 1000 Hz einzustellen. Bei der zyklischen Beanspruchung von AlCuMgSi-Aluminiumlegierungen in Umgebungsluft zeigt sich in dieser Untersuchung bei hohen Lasten und kurzen Lebensdauern ein deutlicher Einfluss der Versuchsfrequenz für diese Werkstoffgruppe. Die Autoren folgern daraus, dass schwache Korrosion der Umgebungsluft Einfluss auf die Lebensdauer dieser zyklisch belasteten Aluminiumlegierungen hat.

Um diese Vermutung zu bestätigen, wird in [Whee66, Brad69] an den Aluminiumlegierungen 5070 und 7075 gezeigt, dass der Wasserdampf in der Umgebungsluft einen Einfluss auf die Lebensdauer dieser Legierungen haben kann. In [Wei.68] werden diese Untersuchungen aufgegriffen und die Zusammensetzungen des Umgebungsmediums variiert. Dabei zeigt sich, dass reine Sauerstoff- und reine Wasserstoffumgebungen nur einen sehr geringen Einfluss auf die Lebensdauer haben, wohingegen Wasserdampf einen großen Einfluss auf die Lebensdauer haben kann. Als Erklärung für diesen Einfluss wird angeführt, dass sich durch eine Reaktion des Wassers mit der frischen Aluminiumoberfläche an der Risspitze Wasserstoff bildet, der mit hohem Druck in die Risspitze gelangt und dort für eine Versprödung sorgt.

Die ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierung EN AW-7075 im unteralterten, maximalausgehärteten und überalterten Zustand wird in [Sure84] untersucht. Fokus der Untersuchung liegt

auf der Rolle der Mikrostruktur und der Umwelteinflüsse auf das Risswachstumsverhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass eine hohe Luftfeuchtigkeit zu einer höheren Rissfortschrittsgeschwindigkeit führt. Aus den Ergebnissen in [Sure84] wird ebenfalls darauf geschlossen, dass ein Zusammenspiel von der Luftfeuchtigkeit, die durch Wasserstoffdiffusion zu einer Versprödung an der Risspitze führt, und dem unterschiedlichen Gleitcharakter in den einzelnen Auslagerungszuständen zu einem unterschiedlichen Rissfortschrittsverhalten kommt. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass die Theorie der Wasserstoffversprödung bis jetzt nur spekulativ ist, da noch keine direkten Beobachtungen dieser Versprödung möglich sind.

Auch wenn der zu Grunde liegende Mechanismus des Umgebungseinflusses auf die Frequenzabhängigkeit der Lebensdauer nicht vollständig bewiesen werden kann, zeigen zahlreiche Veröffentlichungen [Stan01, Maye01, Holp04, Maye06, Zhu.06, Stan06, Engl07, Schn14], dass die Luftfeuchtigkeit bei unterschiedlichen Versuchsfrequenzen einen Einfluss auf Lebensdauer haben kann. So wurde in [Zhu.07] für die Aluminiumgusslegierung E329 ein Modell entwickelt, das die durch die Frequenz verursachte Änderung der Lebensdauer mit dem Partialdruck des Wasserdampfs in der Luft in Verbindung bringt und so rechnerisch eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse bei unterschiedlichen Frequenzen erzielt werden kann.

Der Frequenzeinfluss ist jedoch nicht bei allen Aluminiumlegierungen gleich stark ausgeprägt. In [Engl07] werden 4 verschiedene, nicht weiter spezifizierte Aluminiumlegierungen auf ihren Frequenzeinfluss untersucht. Neben Aluminiumlegierungen, die eine starke Abhängigkeit von der jeweiligen Versuchsfrequenz zeigen, sind auch Aluminiumlegierungen ohne einen Frequenzeinfluss dargestellt. Dabei wird festgestellt, dass Legierungen mit einer höheren Streckgrenze auch höhere Abhängigkeit der Lebensdauer von der Versuchsfrequenz zeigen, Abbildung 2.28.

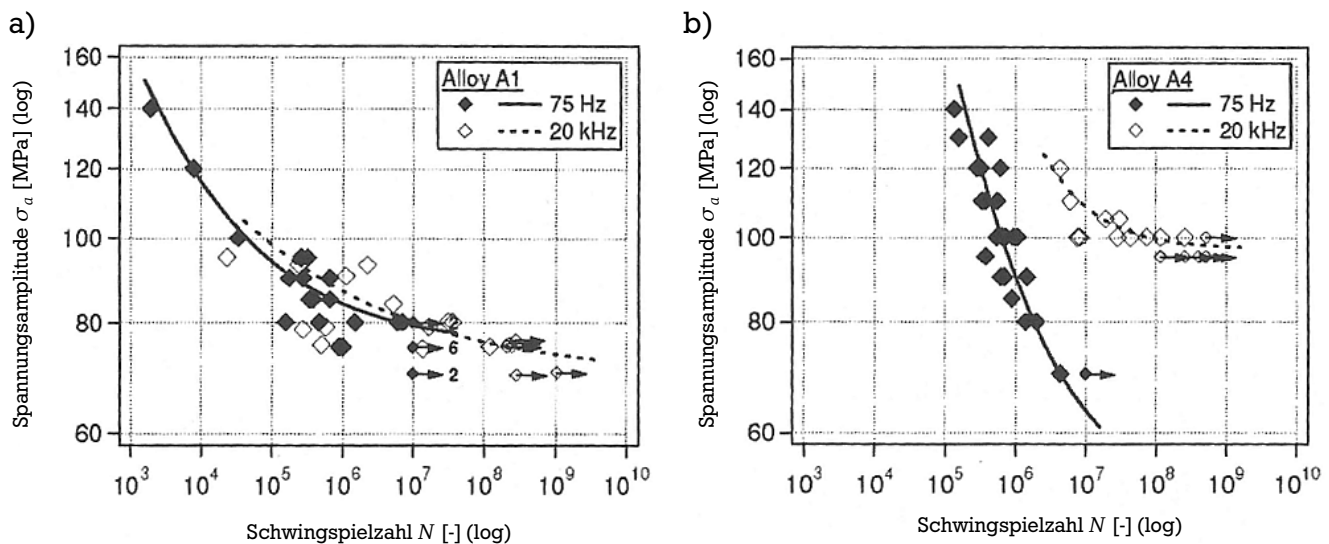


Abbildung 2.28.: Wöhlerlinien einer Aluminiumlegierung a) mit niedriger Streckgrenze zeigen keinen Frequenzeinfluss b) mit hoher Streckgrenze zeigen Frequenzeinfluss [Engl07]

Die Datenbasis aus [Harr61] wird in [Rada07] und [Sons03] als Grundlage für die Darstellung des Anstiegs der ertragbaren Spannungsamplitude mit der Versuchsfrequenz verwendet. Die Spannungsamplitude wird dabei von den Autoren über der logarithmierten Frequenz aufgetragen, Abbildung 2.29. Die logarithmische Aufteilung der Frequenz suggeriert dabei einen

exponentiellen Anstieg der ertragbaren Spannungsamplitude, sodass der Frequenzeinfluss bei niedrigen Frequenzen geringer erscheint als bei sehr hohen Versuchsfrequenzen.

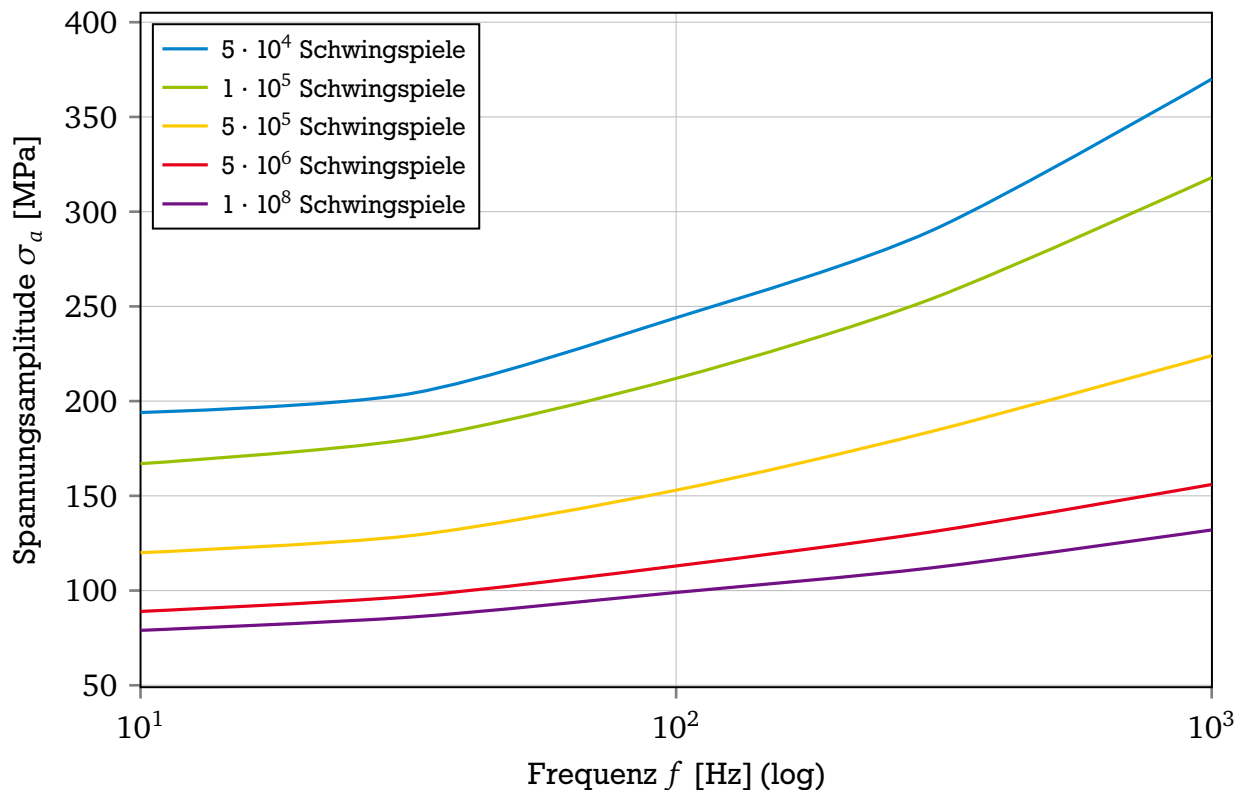


Abbildung 2.29.: Darstellung des Frequenzeinflusses aus Schwingfestigkeitsdaten von HARRIS [Harr59, Harr61] nach [Sons03, Rada07]

Demgegenüber wird schon 1930 [Natu30] gezeigt, dass es bei auftretendem Frequenzeinfluss eine Grenzfrequenz gibt, bei der die Schwingfestigkeit nicht mehr ansteigt. [Lair82] zeigt, dass das Testen mit Ultraschallfrequenzen als vergleichbar mit dem Testen im Vakuum angesehen werden kann und damit zu ähnlichen Lebensdauern führt. Ausgehend von dieser Annahme und der Erkenntnis, dass bei Aluminiumlegierungen die Lebensdauer durch eine korrosive Wirkung der Umgebungsluft beeinflusst werden kann, ist hingegen eher eine Sättigungsfunktion für den Frequenzeinfluss zu erwarten.



3 Zielsetzung

Aus dem Stand der Technik lassen sich folgende Problemstellungen ableiten:

- Die unterschiedlichen Wöhlerlinienmodelle lassen keine durchgehende Beschreibung der Wöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich zu.
- Versuchsergebnisse, die mit hochfrequenter Prüftechnik aufgenommen wurden, können einem Frequenzeinfluss unterliegen.
- Die statische Festigkeit kann bei Aluminiumlegierungen einen Einfluss auf die Ausprägung des Frequenzeinfluss haben.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Beschreibung einer Spannungswöhlerlinie bzw. Dehnungswöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich unter Beachtung des zeitlichen Aufwandes. Besonderes Augenmerk muss dabei auf einen möglichen Frequenzeinfluss gelegt werden, da Versuchsergebnisse im Langzeitfestigkeitsbereich nur mit Hilfe von hochfrequenter Prüftechnik in einer wirtschaftlich ertragbaren Zeit erstellt werden können.

Gerade bei Aluminiumlegierungen kann eine starke Ausprägung des Frequenzeinflusses beobachtet werden, der bei gleicher Lasthöhe bei höheren Prüffrequenzen zu längeren Lebensdauern führt [Step58, Harr59, Whee66, Wei.68, Brad69, Sure84, Stan01, Maye01, Holp04, Maye06, Zhu.06, Stan06, Engl07, Zhu.07, Schn14]. Zudem kann bei verschiedenen AlMgSi-Legierungen [Engl07] eine Korrelation zwischen der Streckgrenze und dem Frequenzeinfluss, jedoch ohne Bezug auf die genaue chemische Zusammensetzung, festgestellt werden. Ausscheidungshärtbare Aluminiumlegierungen bieten über verschieden durchgeführte Wärmebehandlungsabläufe die Möglichkeit, unterschiedliche Festigkeitszustände in einer Legierung mit gleicher chemischer Zusammensetzung einzustellen. Dies ermöglicht die Chance, den Effekt der Streckgrenze auf den Frequenzeinfluss zu separieren, indem das zyklische Werkstoffverhalten verschiedener Wärmebehandlungszustände untersucht wird.

Die Schwingfestigkeit wird deshalb anhand der ausscheidungshärtbaren Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich bei konstanter Belastungsamplitude bestimmt. Die drei unterschiedlichen Wärmebehandlungszustände unteraltert (T4), maximal ausgehärtet (T6) und überaltert (T7) repräsentieren dabei drei verschiedene statische Festigkeitseigenschaften der Aluminiumlegierung.

Eine Bewertung des zyklischen Werkstoffverhaltens wird sowohl mit dehnungsgeregelten Versuchen für den Kurzzeitfestigkeitsbereich als auch mit spannungsgeregelten Versuchen für den Langzeitfestigkeitsbereich aufgenommen. Während für die Durchführung der Kurzzeitfestigkeitsversuche aufgrund der hohen plastischen Dehnungsanteile nur niederfrequente Versuchstechnik verwendet werden kann, werden im Langzeitfestigkeitsbereich zur Untersuchung des Einflusses der Versuchsfrequenz auf die Lebensdauer des Versuchswerkstoffes drei verschiedene Versuchsfrequenzen (140 Hz, 700 Hz, 20 kHz) verwendet.

Dabei ist zu klären, ob und wie der Frequenzeinfluss durch eine stetige Funktion zwischen niedrigen und hohen Frequenzen beschrieben werden kann, um die mit hoher Prüffrequenz

aufgenommenen Versuchsergebnisse auf Lebensdauern von Versuchen mit niedrigeren Versuchsfrequenzen transformieren zu können.

Anhand der Ergebnisse soll es möglich sein, die hochfrequenten Versuchsergebnisse im Langzeitfestigkeitsbereich mit den Ergebnissen aus dem Kurzzeitfestigkeitsbereich kombinieren zu können, sodass eine zusammenhängende Wöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich für niedrige Anwendungsfrequenzen in stark verkürzter Zeit abgeleitet werden kann.

4 Werkstoff- und Versuchsvorbereitung

4.1 Versuchswerkstoff

Als Versuchswerkstoff wird die niedriglegierte AlMgSi-Legierung EN AW-6060 verwendet, deren chemische Zusammensetzung in Tabelle 4.1 dargestellt ist.

Tabelle 4.1.: Chemische Zusammensetzung der AlMgSi-Legierung EN AW-6060 (in mass.-%, Rest Al)

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti+Zr	Andere
0,35-0,6	0,3-0,6	0,1-0,3	0,1	0,1	0,05	0,15	0,10	0,05-0,15

Unterschiedliche Werkstofffestigkeiten werden bei gleicher chemischer Zusammensetzung der Legierung durch verschiedene Wärmebehandlungszustände (Auslagerungszustände) unteraltert (T4), maximal ausgehärtet (T6) und überaltert (T7) eingestellt.

Das Rohmaterial liegt dazu in stranggepresstem Endlosstangenmaterial mit 15 mm Durchmesser vor. Für die Wärmebehandlung werden aus dem Rohmaterial Stangen mit der Länge von 100 mm gesägt, aus denen später die Werkstoffproben gefertigt werden. Als Gefügestand ist vom Hersteller ein undefinierter kaltausgelagerter Zustand angegeben, der nicht als Ausgangsbasis für die Herstellung der Auslagerungszustände verwendet werden kann.

4.2 Wärmebehandlung

Als erster Schritt der Wärmebehandlung wird das Rohmaterial eine halbe Stunde bei 550 °C im Salzbad lösungsgeglüht. Bei diesem Schritt werden alle Legierungselemente in der Aluminiummatrix gelöst. Ein anschließendes Abschrecken innerhalb von 10 Sekunden im Wasserbad auf Raumtemperatur friert den übersättigten Zustand des Mischkristalls ein und bildet die Grundlage für die weiteren Schritte der Wärmebehandlung.

Für die Herstellung des Auslagerungszustand T4 wird der Werkstoff nach dem Lösungsglühen kaltausgelagert. Das Stangenmaterial wird dafür 24 Stunden bei Raumtemperatur ausgelagert. Anschließend wird eine kurze Wärmebehandlung bei erhöhter Temperatur, die eine halbe Stunde bei 175 °C dauert, durchgeführt. Die kurze Wärmebehandlung am Ende der Kaltauslagerung kürzt die Kaltauslagerung ab und stabilisiert den Gefügestand, sodass bei Raumtemperatur keine weitere Veränderung des Gefüges mehr auftritt.

Mit T6 werden Auslagerungszustände bezeichnet, die nach dem Lösungsglühen mit dem Ziel warm ausgelagert werden, eine maximale Festigkeit zu erlangen. Für die Aluminiumlegierung EN AW-6060 führt die klassische Warmauslagerung nach dem Lösungsglühen nicht zu der maximal erreichbaren Festigkeit. Wird vor der eigentlichen Wärmebehandlung eine kurze Auslagerung bei 100 °C mit einer Stunde Haltezeit und eine 24-stündige Kaltauslagerung vorangestellt, hat dies einen positiven Effekt auf die Festigkeit nach der späteren Warmauslagerung [Schl11]. In [Saga96] und [Mura98] wird dieser Effekt mit der durch die kurze Wärmebehandlung entstehenden GP-Zonen erklärt, die wiederum begünstigend auf die Keimbildung der

β'' -Ausscheidungen wirken. Eine Warmauslagerung mit 175 °C und 10 h Haltzeit schließt die Wärmebehandlung zum Zustand T6 ab.

Der überalterte Auslagerungszustand T7 entsteht, wenn die Warmauslagerung nach dem Lösungsglühen sofort nach dem Abkühlen durchgeführt und so lange gehalten wird, bis sich im Gefüge stäbchenförmige β' -Ausscheidungen gebildet haben (s. Kapitel 2.2.1). Gleich nach dem Abschrecken wird der Zustand deshalb bei 200 °C für 20 Stunden warmausgelagert.

In Abbildung 4.1 sind die einzelnen Schritte schematisch dargestellt.

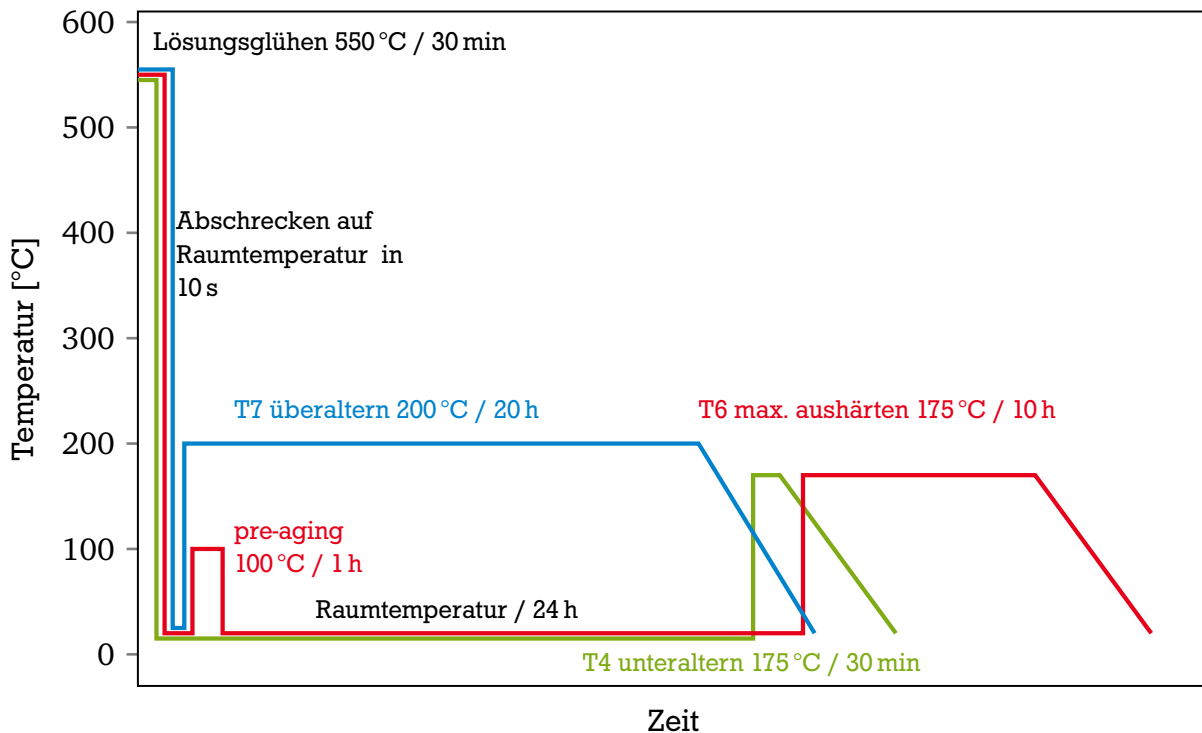


Abbildung 4.1.: Schema der Temperaturverläufe zur Herstellung der unterschiedlichen Auslagerungszustände

Nach der Wärmebehandlung werden alle Zustände an der Luft abgekühlt und einzeln mechanisch und metallurgisch charakterisiert.

4.3 Charakterisierung der Auslagerungszustände

Zur Quantifizierung der durch die Wärmebehandlung eingestellten unterschiedlichen Gefügestände werden die quasi-statischen Werkstoffkennwerte im Zugversuch aufgenommen und die Unterschiede des Gefüges mit Hilfe der Transmissionselektronenmikroskopie sichtbar gemacht.

4.3.1 Auslagerungszustand T4

Im Zustand T4 (Abbildung 4.2, grüne Kurve) verändern sich die quasi-statischen Kennwerte im Vergleich zum lösungsgelühten Zustand nur minimal im Bereich der Dehngrenze $R_{p0,2}$, die sich von 64 MPa im lösungsgelühten Zustand auf 74 MPa erhöht, und der Gleichmaßdehnung A_g , die von 15,3 % um 0,4 % auf 14,9 % abnimmt (vgl. Abbildung 4.2 und Tabelle 4.2). Die erreichte Zugfestigkeit R_m unterscheidet sich mit $R_m = 161$ MPa nicht vom lösungsgelühten Zustand.

Im Gefüge des unteralterten Zustand T4 (Abbildung 4.3 a) liegen die Ausscheidungen als Mg/Si Co-Cluster vor, die in der TEM-Aufnahme nicht sichtbar sind. Der schwarze Punkt im Bild kann über eine energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) Messung als Fe/Mn-haltiger Einschluss erkannt werden, der sich beim Lösungsglühen nicht im Mischkristall löst.

4.3.2 Auslagerungszustand T6

Der Zustand T6 (Abbildung 4.2, rote Kurve) zeigt von allen Auslagerungszuständen mit $R_m = 250$ MPa die höchste Zugfestigkeit und mit $R_{p0,2} = 211$ MPa auch die höchste Dehngrenze. Die Gleichmaßdehnung A_g nimmt jedoch im Vergleich zum Zustand T4 erheblich ab und beträgt $A_g = 5,3\%$.

Abbildung 4.3 b zeigt die Mikrostruktur des maximal ausgehärteten Zustands. Deutlich lassen sich die nadelförmigen β'' -Ausscheidungen (< 100 nm) auf den $< 100 \rangle_{Al}$ Ebenen erkennen. Die größeren grauen Punkte stellen, wie beim unteralterten Zustand T4, ebenfalls Fe/Mn-haltige Einschlüsse dar.

4.3.3 Auslagerungszustand T7

Zugfestigkeit R_m und Dehngrenze $R_{p0,2}$ des Zustands T7 (Abbildung 4.2, blaue Kurve) nehmen im Vergleich mit dem maximal ausgehärteten Zustand T6 wieder ab. Sie liegen mit $R_{p0,2} = 125$ MPa und $R_m = 170$ MPa dennoch um 9 MPa höher als die Festigkeitswerte vom Zustand T4. Die Gleichmaßdehnung bewegt sich mit $A_g = 4,9\%$ nur geringfügig unter dem Niveau der Gleichmaßdehnung des Zustands T6.

Die Ausscheidungen im überalterten Zustand T7 (Abbildung 4.3 c) zeigen eine stäbchenförmige Struktur, die wie im Zustand T6 auf den $< 100 \rangle_{Al}$ Ebenen angeordnet sind. Die Anzahl ist jedoch im Vergleich zum Zustand T6 geringer und die Länge der Ausscheidungen beträgt mehr als 200 nm (β' -Ausscheidungen).

Die dargestellten quasi-statischen Werkstoffkennwerte der einzelnen Zustände sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.2.: Quasi-statische Kennwerte der Auslagerungszustände

	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	Härte HV1
W	68	161	15,3	-
T4	74	161	14,9	50
T6	211	250	5,3	92
T7	125	170	4,9	57

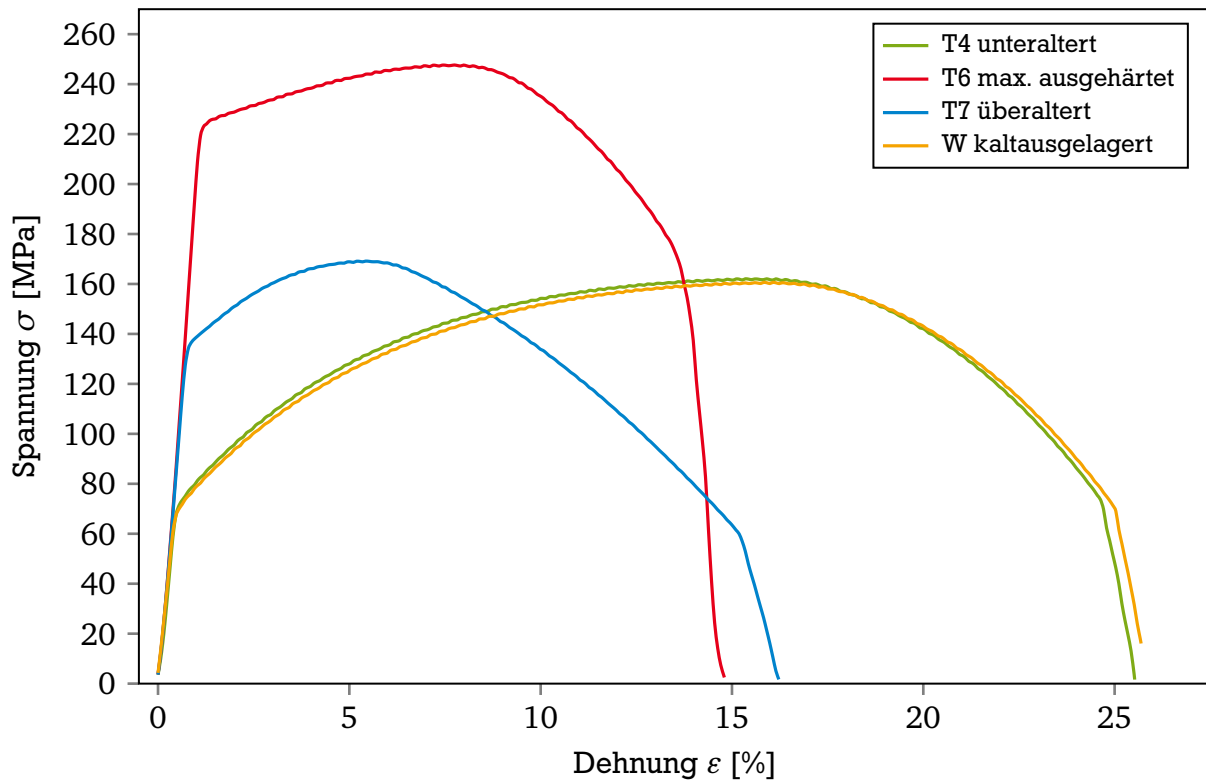


Abbildung 4.2.: Spannungs-Dehnungs-Kurven der Zugversuche

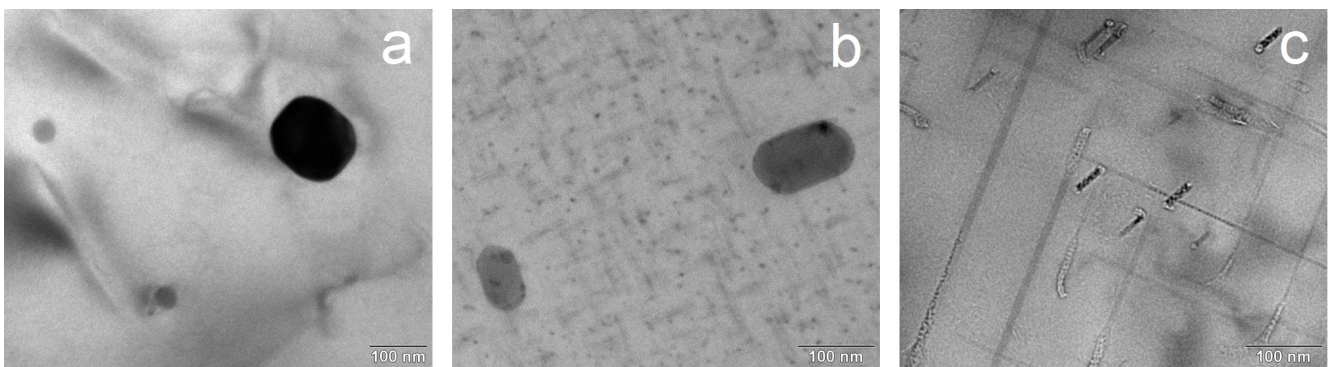


Abbildung 4.3.: TEM Bilder der Mikrostruktur der Auslagerungszustände a) unteraltert T4 b) maximal ausgehärtet T6 und c) überaltert T7

4.4 Probengeometrien

Werden verschiedene Prüfsysteme verwendet, ist eine Anforderung an die Werkstoffproben, dass diese in allen verwendeten Prüfsystemen gleich sind, um gegebenenfalls geometrische Einflüsse auf die Schwingfestigkeit ausschließen zu können. Während die Probenform beim Piezoprüfstand eine beliebige Form annehmen kann, hängt das Schwingverhalten der Probe beim Resonanzpulsar und des Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstands von der Probengeometrie ab. Für die Versuche im Resonanzpulsar aber auch im Piezoprüfstand sollte die Probe eine möglichst hohe Steifigkeit aufweisen, um hohe Frequenzen zu erreichen. Die Ultraschallschwingfestigkeitsprobe muss dagegen so konstruiert sein, dass die Probe im Bereich von 20 kHz eine Eigenfrequenz in Zug/Druckrichtung ausbildet.

Für die späteren metallkundlichen Untersuchungen mit Hilfe von hochauflösenden Messgeräten ist es zudem wichtig, dass die Schädigungen in einem gut abschätzbaren Bereich auf der Probe auftreten.

Um allen Anforderungen gerecht zu werden, wird eine sanduhrförmige Probenform verwendet, (Abbildung 4.4).

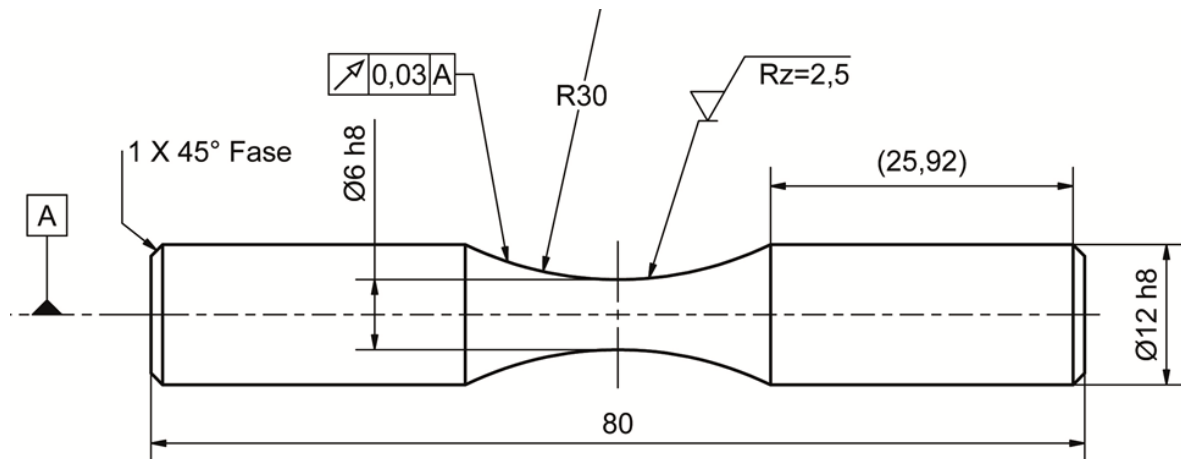


Abbildung 4.4.: Probengeometrie der spannungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuche

Prüfstandsbedingt (s. Kapitel 5.3.1) muss die Probe für die Ultraschallschwingfestigkeitsversuche in den Einspannbereichen so angepasst werden, dass sie zum einen an den Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstand angebracht werden kann und zum anderen das Schwingverhalten der Probe auf die Zug/Druck Eigenfrequenz von 20 kHz eingestellt wird (Abbildung 4.5). Dazu werden die Proben mit einem zusätzlichen Gewinde am oberen Einspannbereich gefertigt und die Einspannbereiche von 12 mm auf 14 mm vergrößert. Der Prüfquerschnitt ist unverändert zu den übrigen Proben.

Aus dehnungsgeregelten Versuchen können zusätzliche Informationen über das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten eines Werkstoffes gewonnen werden. Die Dehnung muss als zusätzliche Messgröße an der Probe aufgenommen werden (s. Kapitel 5.1 und Abbildung 5.1). Eine Probengeometrie für dehnungsgeregelte Versuche muss deshalb immer genügend Platz für einen Dehnungsaufnehmer beinhalten und in dem Messbereich der Dehnung einen konstanten Probenquerschnitt aufweisen. In Abbildung 4.6 ist die Probengeometrie für die dehnungsgeregelten Versuche für den verwendeten Dehnungsaufnehmer mit der Messlänge von 10 mm dargestellt.

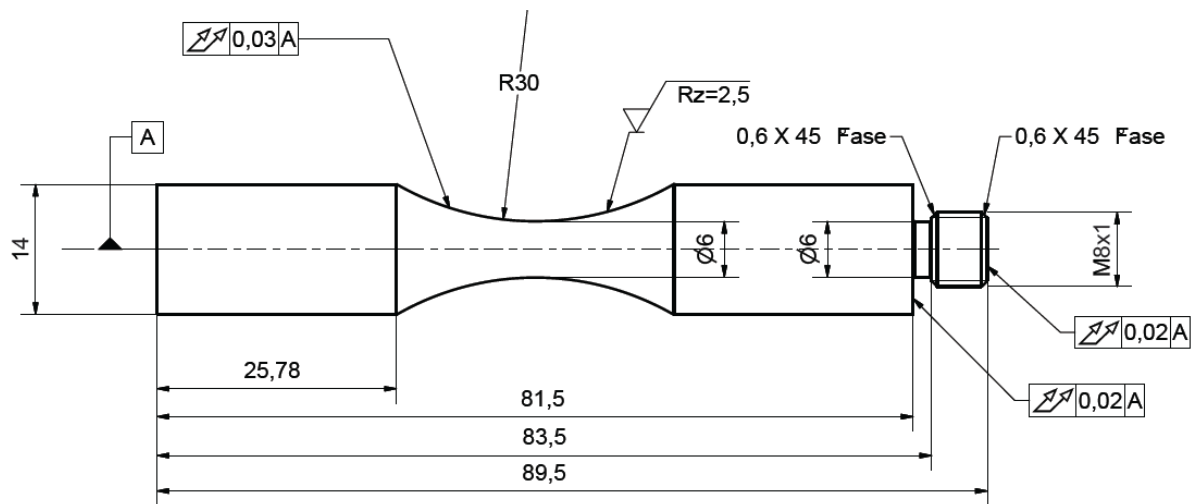


Abbildung 4.5.: Probengeometrie der Ultraschallschwingfestigkeitsversuche

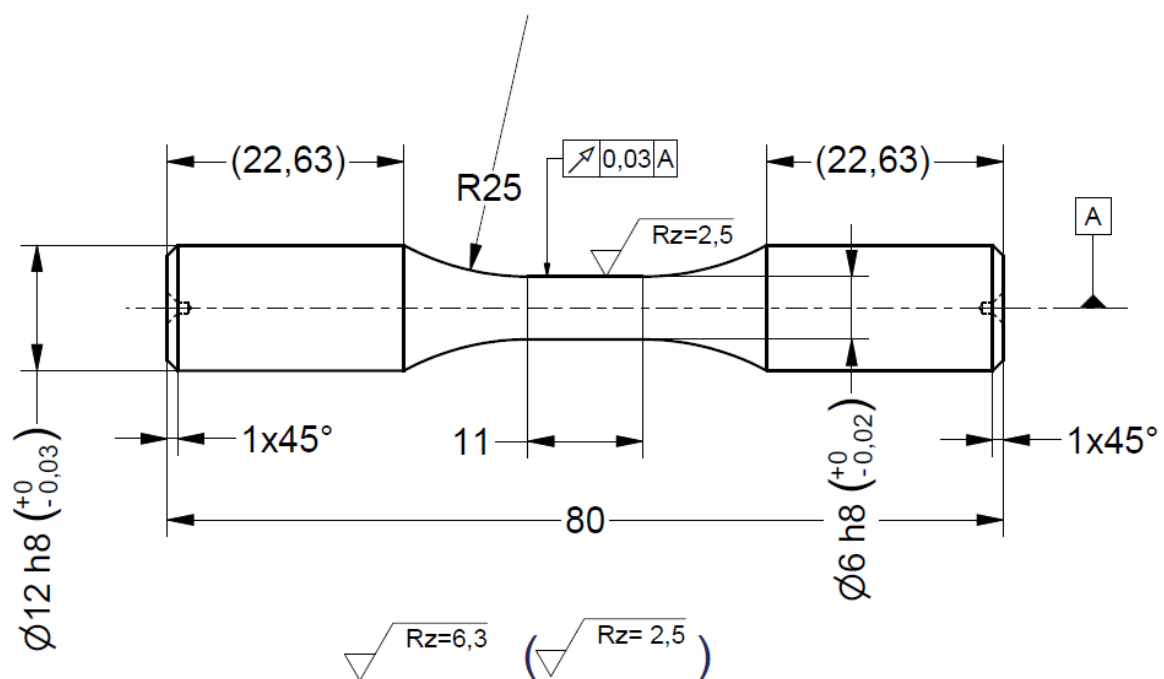


Abbildung 4.6.: Probengeometrie für die dehnungsgeregelten Versuche

4.5 Polieren der Probenoberfläche

Die Beschaffenheit der Probenoberfläche hat einen großen Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Während Oberflächenrauheiten durch ihre kerbenartige Struktur zu kürzeren Lebensdauern führen, können durch die Fertigung eingebrachte Druckeigenspannungen lebensdauerverlängernd wirken. Eine so durch die Fertigung der Probe zufällig angeordnete Oberflächenstruktur erhöht die Streuung der Versuchsergebnisse und mindert die Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse untereinander. Abbildung 4.7 zeigt die Oberflächenstruktur der Probe direkt nach der Fertigung. Deutlich erkennbar ist die Rauheit der Probe, die sich durch die drehende Zerspanung als Drehriefen auf der Probenoberfläche ausgebildet hat.

Um eine definierte Oberflächenstruktur zu erhalten, wird die Probenoberfläche poliert. Durch die mechanischen Polierverfahren kann dabei keine zufriedenstellende Oberfläche hergestellt werden. Selbst durch Säubern der Probe zwischen jedem Polierschritt und einem finalen Polieren mit Diamantspray mit $0,25\ \mu\text{m}$ Körnung ist die Herstellung einer kratzerfreien Oberfläche nicht möglich.

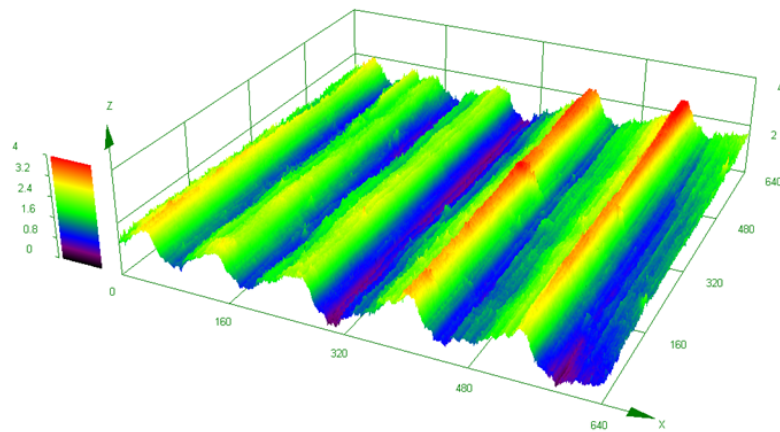


Abbildung 4.7.: Probenrauheit nach der Fertigung [Schl11]

Elektrolytische Polierverfahren führen bei metallischen Werkstoffen zu deutlich besseren Oberflächenbeschaffenheiten. Aus diesem Grund wurde in [Schl11] die Machbarkeit eines elektrolytischen Polierens getestet. Der konstante Polierstrom führt bei der verwendeten Aluminiumlegierung EN AW-6060 jedoch zu einer wellen- bzw. kraterförmigen Oberflächentopologie, Abbildung 4.8. Die Tiefe der kraterförmigen Oberflächenstruktur nimmt mit der Einwirkzeit des Polierstroms zu. Ein stark verkürztes Einwirken des Polierstroms führt zu einer glatteren Oberflächenstruktur. Das kurze Einwirken des Polierstroms reicht jedoch nicht aus, um einen genügend großen Materialabtrag zu gewährleisten, der größere Rauheitsspitzen abträgt.

Aus diesen Erkenntnissen wird in [Schl11] ein Verfahren zum gepulsten elektrolytischen Polieren entwickelt. Dabei werden kurze Pulse des Polierstroms so oft wiederholt, bis eine glatte Oberfläche vorhanden ist. Durch eine geeignete Wahl des Puls-Pause-Verhältnis kann für die Aluminiumlegierung EN AW-6060 eine glatte Oberfläche mit einer Rautiefe von $R_z = 240\ \text{nm}$ erreicht werden, Abbildung 4.9. Die Oberfläche der Probe weist dabei keine Löcher auf und die Korngrenzen werden nicht zusätzlich angegriffen.

Durch die einstellbare Dauer des Polierstromimpulses kann die Abtragsrate des Materials mit der Zeit korreliert werden. Ein durchschnittlicher Materialabtrag von $150\ \mu\text{m}$ sichert beim Polieren

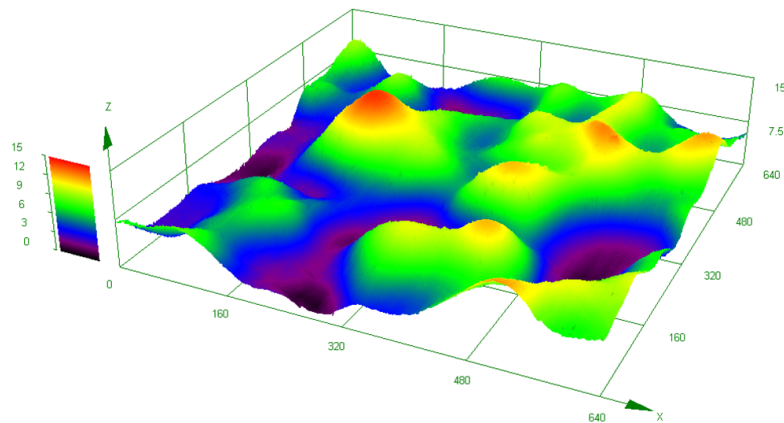


Abbildung 4.8.: Oberflächenstruktur einer klassisch elektropolierten Aluminiumprobe

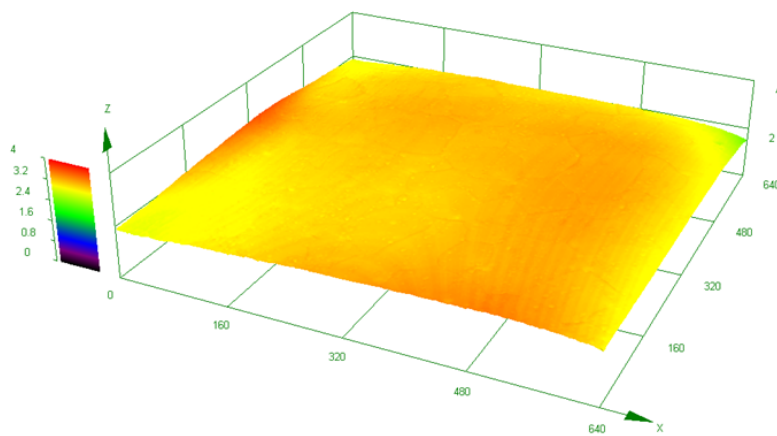


Abbildung 4.9.: Polierergebnis nach gepulsten elektrolytischem Polieren

der Proben ab, dass die durch die Fertigung mit Eigenspannungen beeinflussten Bereiche der Probe entfernt werden.

4.6 Prüfstandsvorbereitung

Einspannungen der Prüfstände mit einem geschlossenen Kraftfluss wie z.B. servohydraulische Prüfstände, Resonanzpulser oder der Piezoprüfstand (vgl. Kapitel 5) werden so ausgerichtet, dass keine Querkräfte der eingespannten Probe überlagert werden und eine reine Belastung in axialer Richtung gewährleistet werden kann. Die richtige Ausrichtung der Einspannung wird mit einer Probe mit vier Dehnmessstreifen (DMS) überprüft. Mit mehrmaligem Ein- und Ausbauen der Probe und überprüfen der dabei entstehenden Dehnungen wird bestätigt, dass keine Querkräfte oder Biegespannungen durch das Ein- und Ausspannen der Probe überlagert werden.

5 Prüftechnik

Für die zyklische Werkstoffprüfung stehen unterschiedliche Prüfmaschinenkonzepte zur Verfügung. Jedes dieser Prüfmaschinenkonzepte hat ihre Vor- bzw. Nachteile. Dabei ist nicht jede Prüfmaschine gleich gut für Prüfungen in den einzelnen Wöhlerlinienbereichen zwischen Kurzzeit- und Langzeitfestigkeitsbereich geeignet. Prüfkonzepte wie servohydraulische Prüfmaschinen und Resonanzprüfmaschinen mit Unwucht- bzw. elektromagnetischem Antrieb werden seit langem in der zyklischen Werkstoffprüfung eingesetzt. Sie haben jedoch den Nachteil, dass die maximale Prüffrequenz begrenzt ist und somit in einer wirtschaftlich vertretbaren Zeit keine Ergebnisse im Langzeitfestigkeitsbereich zu generieren sind. Dem gegenüber stehen neue Prüfkonzepte, wie die Ultraschallprüftechnik oder die piezobasierte Prüftechnik, die sehr hohe Prüffrequenzen ermöglichen. Im Folgenden werden die verwendeten Prüfkonzepte genauer erläutert.

5.1 Servohydraulische Prüfstände

Servohydraulische Prüfmaschinen werden in vielen Anwendungsbereichen der experimentellen Betriebsfestigkeit eingesetzt. Sie bestehen aus einem Lastrahmen, in den der Hydraulikzylinder als Aktor eingesetzt ist. Ein Servoventil, das zwischen Druckölleitung und Zylinder montiert ist, steuert die Richtung des Ölflusses im Zylinder. Die Kraftmessdose, mit der die Kräfte während des Versuchs gemessen werden, ist im Kraftfluss gegenüber des Hydraulikaktors auf dem feststehenden Lastrahmen angebracht und wird somit nicht bewegt. Zwischen Aktuator und Kraftmessdose befindet sich die Probeneinspannung, in der die Werkstoffprobe fest eingespannt wird. Über den Aktuator, Probeneinspannung, Kraftmessdose und Lastrahmen wird bei den servohydraulischen Prüfmaschinen ein geschlossener Kraftfluss realisiert, Abbildung 5.1. Die individuelle Steuerung des Ventils über eine Elektronik lässt dabei eine sehr variable Regelung zu. Sowohl variable Belastungsamplituden als auch variable Frequenzen sind realisierbar. Servohydraulische Prüfstände zeichnen sich durch hohe Kräfte und große Hübe aus. Die Prüffrequenzen sind bis auf wenige Ausnahmen auf < 50 Hz begrenzt. Für Untersuchungen im Kurzzeitfestigkeitsbereich sind diese Frequenzen ausreichend, da in diesem Bereich hohe Dehnungen aufgebracht werden und nur kleine Schwingungszahlen erreicht werden müssen.

Servohydraulische Prüfstände können sowohl für kraftgeregelte als auch für dehnungsgeregelte Versuche genutzt werden. Die kraftgeregelten Versuche werden auf das Signal der Kraftmessdose geregelt. Für dehnungsgeregelte Versuche wird ein Dehnungsaufnehmer auf die Probe aufgesetzt, der in einem definierten Bereich mit konstantem Querschnitt die Dehnung aufnimmt. Die Regelung der jeweiligen Sollwerte wird über einen PID-Regler mit adaptivem Spitzenwertregler realisiert.

5.2 Resonanzprüfstand

Resonanzprüfstände existieren mit verschiedenen Antriebsvarianten. Für höherfrequente Versuche haben sich die elektromagnetischen Resonanzpulser gegenüber den unwuchterregten Re-

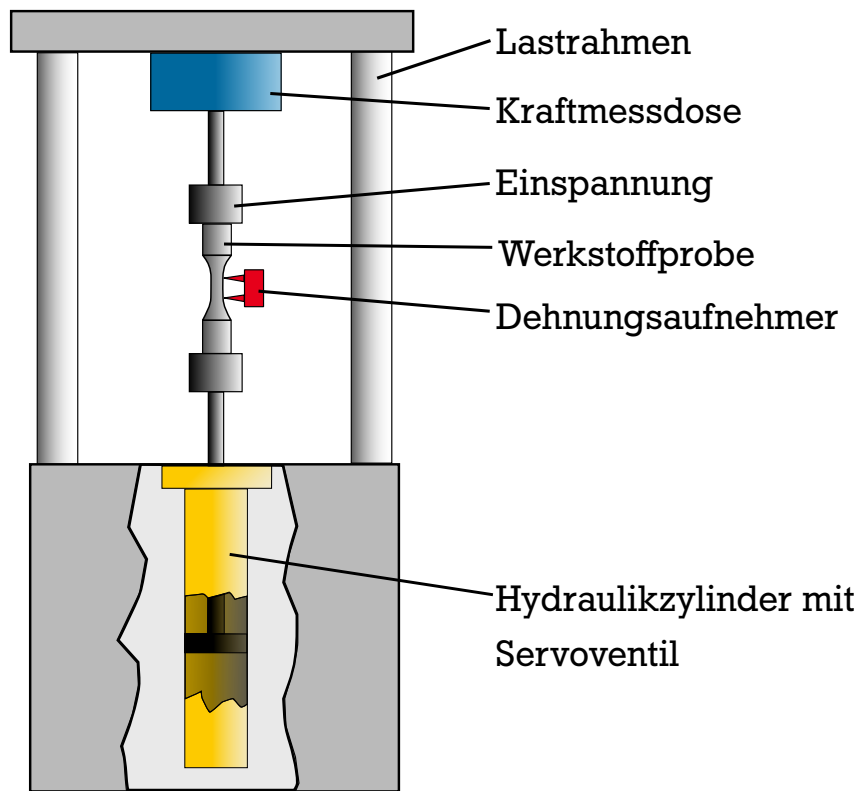


Abbildung 5.1.: Schematischer Aufbau eines servohydraulischen Prüfstandes

sonanzpulsern durchgesetzt. Unabhängig vom Antrieb basieren diese Prüfmaschinen auf dem Prinzip eines mechanischen Schwingkreises.

Die Versuchsfrequenz kann bei diesem Prüfsystem nicht direkt über die Regelungstechnik vorgegeben werden, sondern hängt von den Eigenschaften des Prüfsystems wie z.B. der Steifigkeit der Probe und den Erregermassen ab. Durch eine Probe mit hoher Federsteifigkeit kann die Prüffrequenz erhöht werden. Die Reduzierung der Erregermasse bewirkt ebenfalls eine Erhöhung der Prüffrequenz, verringert dabei jedoch die maximal erreichbaren Kräfte.

Die Abhängigkeit der Prüffrequenz f_0 wird in [Muel11] mit Gleichung 5.1 beschrieben. Dabei wird der mechanische Schwingkreis vereinfacht als zwei Feder-Massen-System angenommen. Die zu prüfende Probe wird dabei inklusive der Einspannung vereinfacht als Stab mit der Länge L , der Querschnittsfläche A_F und dem temperaturabhängigen E-Modul $E(T)$ angenommen. Die Sinusschwingung wird zwischen den Massen m_0 und m_1 aufgebracht.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E(T)A_F}{L} \frac{m_0 + m_1}{m_0 \cdot m_1}} \quad (5.1)$$

Hochdynamische Resonanzprüfmaschinen erreichen bei sehr hohen Probensteifigkeiten Prüffrequenzen von bis zu 400 Hz. In der Regel werden mit elektromagnetischen Resonanzpulsern Prüffrequenzen zwischen 50 und 200 Hz erreicht.

5.3 Piezobasierte Prüfsysteme

Eine axiale Verformung von Piezomaterialien bewirkt aufgrund des unsymmetrischen Kristallaufbaus eine Verschiebung der Ladungsschwerpunkte im Gitter des Piezokristalls, die als elektrische Spannung an den Außenseiten gemessen werden kann. Dieses Phänomen wird piezoelektrischer Effekt genannt. Umgekehrt kommt es beim reziproken oder inversen piezoelektrischen Effekt zur Ausdehnung des Piezomaterials, wenn eine Spannung an die Außenseiten angelegt wird [Melz02].

Der inverse piezoelektrische Effekt wird für die Erzeugung von Schwingungen genutzt. Die Ausnutzung dieses Festköpereffekts ermöglicht die Herstellung von Piezoaktuatoren mit sehr guten dynamischen Eigenschaften und Stellgenauigkeiten im Submikrometerbereich. Piezoaktuatoren sind aufgrund ihrer hochdynamischen Eigenschaften prädestiniert in einem weiten Frequenzbereich zyklische Kräfte zu erzeugen.

Dabei wird in der Anwendung zwischen Resonanzbetrieb, wie bei Ultraschallgeneratoren, und den frei verfahrbaren Piezoaktuatoren (z.B. Hochleistungs-Piezoaktuatoren) unterschieden. In den letzten Jahrzehnten wurden auf Basis des Resonanzprinzips mit Hilfe von Ultraschallgeneratoren Werkstoffprüfmaschinen entwickelt. Diese werden in der Literatur [Bath04a, Bath06] auch als Piezoprüfstände dargestellt. Mit der Entwicklung einer Werkstoffprüfmaschine auf Basis eines Hochleistungs-Piezoaktuators am Fraunhofer LBF muss diese Definition differenzierter betrachtet werden. Dies wird im folgenden mit der Beschreibung der verschiedenen piezobasierten Prüfstandsprinzipien erfolgen.

5.3.1 Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstand

Die ersten Ideen zur Schwingfestigkeitsprüfung mit Ultraschalltechnik wurden schon 1950 von MANSON umgesetzt. Obwohl diese von weiteren Wissenschaftlern stetig weiterentwickelt [Stan01] und Bestrebungen der Normung durch die ASTM vorangetrieben wurden, gibt es noch keine einheitliche Norm für die Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstände [Bath04b].

Weltweit beschäftigen sich Forschungsstellen mit eigens entwickelten Ultraschallschwingfestigkeitsprüfständen und den dazu selbstentwickelten Testprozeduren. Hierzu gehören unter anderem die Forschungseinrichtungen von WILLERTS (USA), STANZL-TSCHEGG (Österreich), BATHIAS (Frankreich), NI (China), ISHII (Japan), PUSKAR (Slowenien) und EIFLER (Deutschland).

Folgende Komponenten, [Bath04b], haben diese Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstände gemeinsam:

1. Einen Transformator, der die 50 bzw. 60 Hz Netzfrequenz der Stromversorgung in ein sinusförmiges 20 kHz Ultraschallsignal umwandelt.
2. Einen piezoelektrischen (oder magnetostriktiven) Schwinger, der das elektrische Spannungssignal so in mechanische Vibration umwandelt, dass Ultraschallwellen mit 20 kHz erzeugt werden.
3. Ein Horn, das die Amplituden vom Schwinger verstärkt und dem Prinzip einer in der Ultraschalltechnik üblichen Sonotrode entspricht, vgl. [Dilt06, Dubb07].

Weitere Komponenten sind eine Amplitudenkontrolleinheit, eine Frequenzkontrolleinheit, ein Schwingspielzähler und ein Oszilloskop.

Für die zyklischen Versuche mit einer Prüffrequenz von $f = 20$ kHz wird ein Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstand nach [Maye99] eingesetzt.

Der schematische Aufbau der Ultraschallprüftechnik ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Der Lastrahmen der Maschine ist beim Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstand nur als Aufhängung für den Ultraschallgenerator gedacht, an den das Titanhorn zur Verstärkung der Amplituden montiert wird. Die Werkstoffprobe wird für den Versuch fest mit dem Horn verbunden. Die Probenform ist so ausgelegt, dass das System aus Horn (Abbildung 5.2 B–C) und Probe (Abbildung 5.2 A–B) zwischen 18 und 21,5 kHz eine Eigenfrequenz in axialer Richtung aufweist. Die Probenform wird hierfür mit numerischen Methoden so optimiert, dass die Werkstoffprobe bei sinusförmiger Anregung im Bereich von 20 kHz mit dem Lastverhältnis von $R = -1$ ausgelenkt wird, Abbildung 5.2.

Da zwischen Lastrahmen und Probe kein geschlossener Kraftfluss besteht, können Kräfte nicht wie bei den anderen Prüfsystemen über eine Kraftmessdose gemessen werden. Kräfte müssen über die im Prüfquerschnitt resultierenden Dehnungen berechnet werden. Bei einer Versuchsfrequenz von 20 kHz ist eine klassische Dehnungsmessung jedoch nicht möglich, da die Haltbarkeit der Dehnungsmessstreifen (DMS) bei hohen Frequenzen in dem Kraftbereich der Prüfung nicht gewährleistet ist. Über eine mit Dehnungsmessstreifen beklebte Probe wird die Messung vor den ersten Versuchen kalibriert. Beim Anbringen der DMS muss beachtet werden, dass die Belastung über die Probenlänge nicht konstant ist, sodass die DMS exakt in der Mitte der Probe angebracht werden müssen. Um eventuelle Biegeanteile ausschließen zu können, werden mindestens 3 DMS pro Probe appliziert. Die Kalibrierung wird bei Wegamplituden von $0,03\text{ }\mu\text{m}$ bis $0,09\text{ }\mu\text{m}$ durchgeführt und die Dehnungswerte für höhere Dehnungen unter der Annahme, dass ein linearer Zusammenhang zwischen erzeugter Dehnung und der Spannung im Prüfquerschnitt besteht, linear skaliert. Die Kräfte werden im Anschluss aus den Dehnungen ebenfalls unter der Annahme des linear-elastischen Werkstoffverhaltens in Spannungen umgerechnet.

Mit der Auslegung und Berechnung der Probe und der Kalibriermessungen ist eine Beziehung zwischen Schwingungsanregung und der Belastung der Probe definiert. Dies ermöglicht eine indirekte Regelung der Schwingungsamplitude am Horn. Die Amplitudenkontrolleinheit am Horn überwacht, ob die erzeugten Schwingungsamplituden dem ausgerechneten Sollwert für die jeweilige Belastung entsprechen. Eine Rückkopplung mit der Verstärkereinheit ermöglicht das Nachstellen der Leistung des Ultraschallgenerators über einen PID-Regler. Ebenfalls kann die Frequenz am Horn ausgewertet werden. Durch diesen Regelkreis wird die gleichmäßige Schwingung des Resonanzsystems aus Probe und Horn gewährleistet und die Möglichkeit für eine Anrissdetektion ermöglicht. Mit optimierten Regelparametern ist laut [Maye99] eine Regelgenauigkeit von 99 % möglich. Eine direkte Aussage über die Belastungen der Probe ist jedoch nicht möglich, da wegen des fehlenden Kraftflusses und der hohen Frequenz keine Weg-, Kraft oder Dehnungsmessung direkt an der Probe möglich ist.

Aufgrund der sehr hohen Prüffrequenzen im Bereich von 20 kHz besteht die Möglichkeit, dass die eingebrachte Verformungsenergie in der Probe in Wärme umgewandelt wird und die Probe übermäßig erwärmt wird. Um dies zu verhindern, werden die Schwingspiele in den meisten Fällen nur gepulst auf die Probe aufgebracht.

Durch die freischwingend aufgehängte Probe lässt sich das Schwingverhalten der Probe mit einer periodisch angeregten, gedämpften harmonischen Schwingung [Drei11] beschreiben. Somit ergibt sich für jeden Puls-Pause-Zyklus eine Aufteilung in drei Abschnitte. Abbildung 5.3 zeigt einen typischen Puls mit einem Einschwingvorgang (1), dem Bereich konstanter Belastungsamplitude (2) und dem Ausschwingvorgang (3) [Kost11]. Als minimale, sinnvolle Anzahl werden

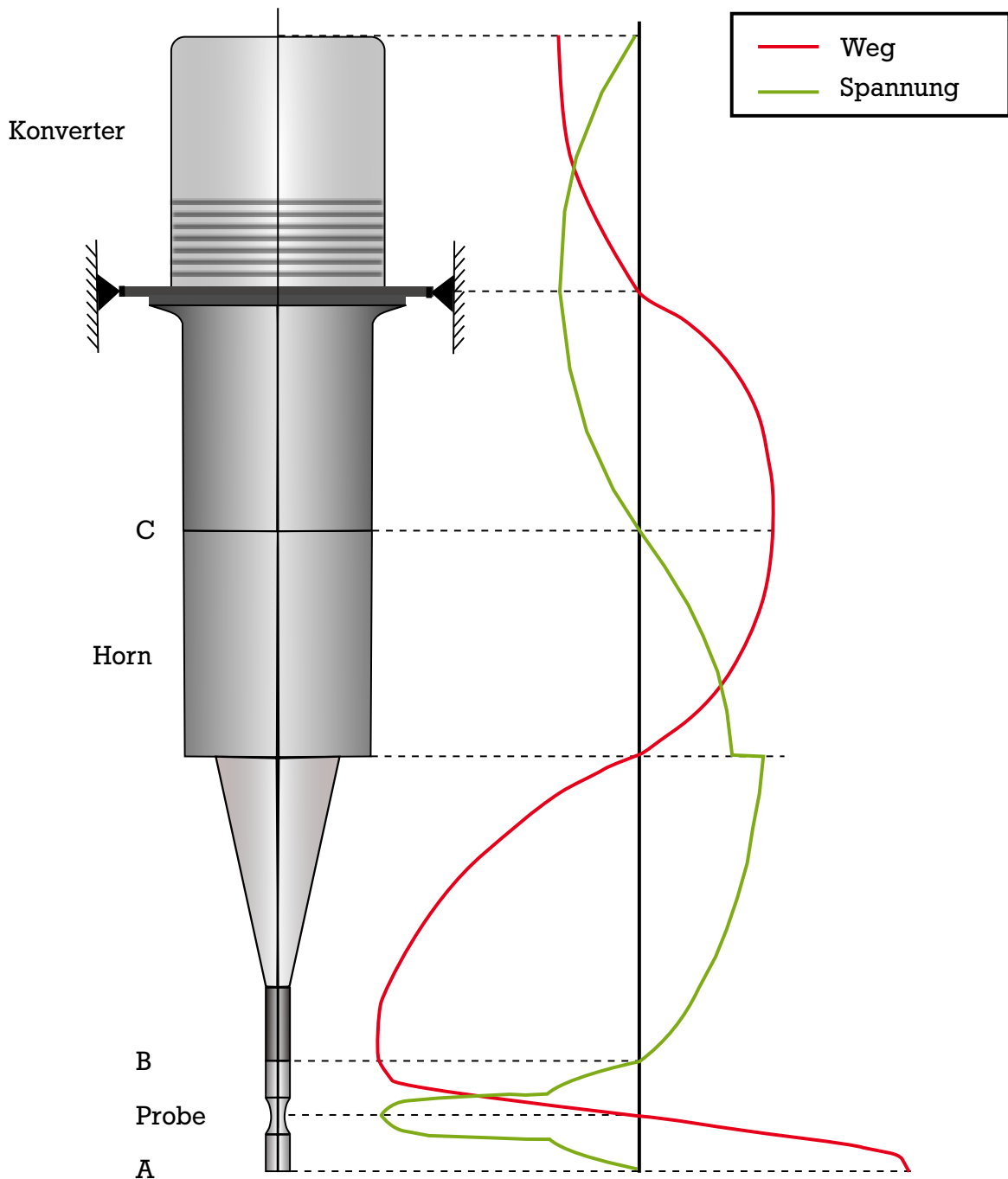


Abbildung 5.2.: Schematischer Aufbau des Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstandes mit Spannungs- und Wegverlauf nach [Bath04b]

in [Maye99] 500 Schwingspiele pro Puls angegeben. Ausgewertet für die Schwingfestigkeit werden die Zyklen im Abschnitt (2). Schwingspiele im Einschwing- und Ausschwingvorgang werden nicht mitgezählt und somit bei der Betrachtung der Lebensdauer vernachlässigt.

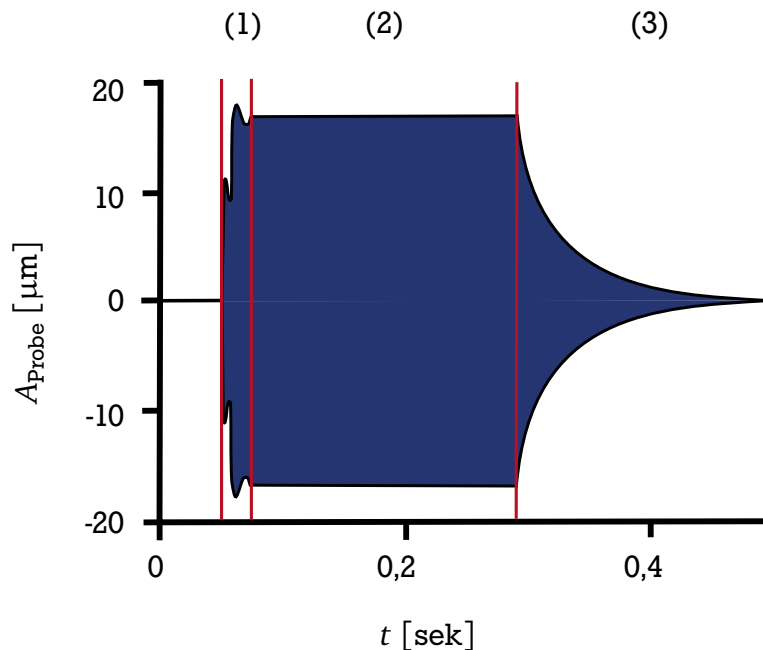


Abbildung 5.3.: Beispiel für einen Puls des Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstands nach [Kost11]

5.3.2 Prüfmaschine mit Hochleistungspiezoaktor

In den letzten Jahren ist auf Basis eines Hochleistungspiezoaktors eine Hochfrequenzprüfmaschine für zyklische Versuche [Fisc11, Wage11, Fisc12, Wage12, Fisc13, Lanz14, Fisc14b] entwickelt worden, welche die große Flexibilität der servohydraulischen Prüfsysteme mit einer hohen Prüffrequenz vereint. Somit wird die Lücke der Prüffrequenz zwischen den Resonanzprüfmaschinen und den Ultraschallschwingfestigkeitsprüfständen verringert.

Die Eigenschaften von Piezoaktuatoren sind durch ihre schnelle Reaktionszeit, den geringen Energieverbrauch und der Möglichkeit hohe Kräfte aufzubringen für diese Aufgabe besonders gut geeignet. Durch die begrenzte Leistungsfähigkeit der Mess- und Regelungstechnik und den geringen Aktorweg sind Piezoaktuatoren in der Vergangenheit nicht wie servohydraulische Aktuatoren in Prüfmaschinen eingesetzt worden. Der neu entwickelte Hochleistungspiezoaktor mit einer Blockierkraft von 10 kN und einem Aktorweg von 1 mm hat nun die Entwicklung eines neuartigen Prüfprinzips ermöglicht.

Im Gegensatz zur Ultraschalltechnik ist bei diesem Piezoprüfstand ein direkter Kraftfluss zwischen Hochfrequenzlastrahmen, Kraftmessdose, Werkstoffprobe mit Einspannung und dem Piezoaktor vorhanden, Abbildung 5.4. Über die Kraftmessdose und den geschlossenen Kraftfluss wird eine direkte Messung der Kraft ermöglicht. Der Aktorweg wird mit einem hochpräzisen Wirbelstromwegaufnehmers direkt an der Einspannung gemessen, der Distanzänderungen in der Größe von $\leq 1 \mu\text{m}$ auflösen kann. Das speziell entwickelte Design und die Werkstoffauswahl des Hochfrequenzlastrahmens sind strukturdynamisch so optimiert worden, dass dieser



Abbildung 5.4.: Aufbau Prüfmaschine mit Hochleistungspiezoaktuator¹

keine Eigenfrequenzen unter 1100 Hz ausbildet. Dies ermöglicht Prüffrequenzen von bis zu 1000 Hz ohne einen Einfluss durch eine Schwingungsanregung des Lastrahmens.

Durch eine auf den Prüfstand abgestimmte Hochgeschwindigkeitsregelungstechnik, können die Daten für die einzelnen Regelkanäle, wie z.B. Weg und Kraft, mit einer Frequenz von 100 kHz abgerufen werden. Bei 1000 Hz Versuchsfrequenz werden so noch 100 Messpunkten pro Schwingenspiel aufgenommen. Die Regelungsparameter können über einen PID-Regler vorgegeben und mit einem adaptiven Spitzenwertregler hochgenau auf den jeweiligen Sollwert geregelt werden. Neben der Kraftregelung sind auch weitere Regelungsarten wie Weg- und Dehnungsregelung möglich.

Im dynamischen Betrieb sind die erreichbaren Prüfwege und -kräfte von den Prüfparametern abhängig. Die realisierbare Prüffrequenz ist dabei von dem benötigten Weg bzw. der Probensteifigkeit und der maximal zur Verfügung stehenden Energie abhängig. Auch die Grenzen von Kraft und Weg sind von der Probensteifigkeit abhängig. Abbildung 5.5 zeigt typische Arbeitsdreiecke für einen Piezoaktor mit einer Probe mit hoher Probensteifigkeit und einer Probe mit geringer Steifigkeit. Dabei wird deutlich, dass die maximal erreichbaren Kräfte proportional zur Probensteifigkeit zu und der maximal erreichbare Weg abnimmt.

Für kleine Wege und hohe Frequenzen bei vergleichsweise niedrigen Kräften, wie sie bei Prüfungen im Langzeitfestigkeitsbereich benötigt werden, liegen die für die Prüfung wichtigen Kräfte und Hübe im dunkelgrauen Dreieck, Abbildung 5.5.

5.4 Diskussion der Prüftechnik

Eine Prüfmaschine, die alle Anwendungsgebiete gleich gut abdecken kann, ist bis jetzt nicht vorhanden. Vielmehr muss die Prüftechnik so ausgewählt werden, dass Prüfungen unter optimalen

¹ Foto: „Hessen schafft Wissen“ / Fraunhofer LBF

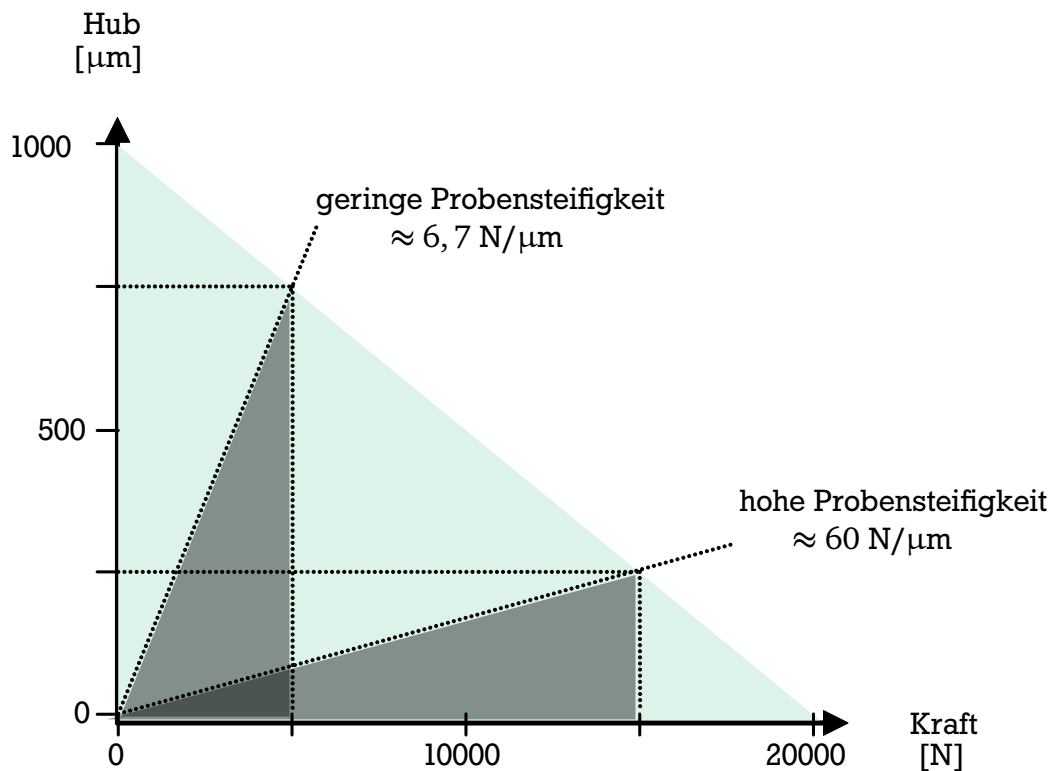


Abbildung 5.5.: Arbeitsdiagramm eines Piezoaktuators (schematisch) [Fisc12]

Bedingungen ausgeführt werden können. Servohydraulische Prüfsysteme sind mit ihrer Möglichkeit hohe Kräfte, große Wege und sehr variable Belastungs-Zeit-Funktionen zu übertragen, prädestiniert für Betriebsfestigkeitsversuche. Hohe Prüffrequenzen können mit diesen System allerdings nicht erreicht werden. Müssen Versuchsergebnisse in einer kurzen Zeit erbracht werden, bieten sich bei hohen Kräften Resonanzpulsar oder bei kleinen Kräften Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstände an. Hierbei muss aber auf Zufallslasten verzichtet werden, da mit diesen Prüfsystemen nur Wöhlerversuche, das heißt konstante Amplitudenversuche, durchgeführt werden können.

Einen hohen Grad an Variabilität in Verbindung mit hohen Prüffrequenzen bietet der Piezoprüfstand mit einem Hochleistungspiezoaktor. Variable Frequenzen in Verbindung mit variablen Amplituden können bis in den Langzeitfestigkeitsbereich durchgeführt werden. Große Wege, große Bauteile und hohe Lasten über 10 kN können mit diesen Piezoprüfständen jedoch nicht untersucht werden. Vielmehr können neben den schon genannten Eigenschaften auch hochpräzise Prüfungen im Bereich von wenigen μm und wenigen N auf diesen Prüfständen durchgeführt werden.

Ein Überblick über den Anwendungsbereich bei der Werkstoffcharakterisierung an Werkstoffproben zeigt Abbildung 5.6. Durch die Möglichkeit hohe Lasten mit niedrigen Frequenzen und niedrige Lasten mit hohen Frequenzen aufbringen zu können, können die Piezoprüfstände einen großen Bereich der Wöhlerlinie ohne Änderung der Probengeometrie abdecken.

Für Untersuchungen im Langzeitfestigkeitsbereich bieten sich deshalb Piezoprüfstände und Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstände an. Zum Vergleich der Prüfergebnisse wird vielfach auf die bewerte Technik der Resonanzpulsar zurückgegriffen, auch wenn die Erstellung der Versuchsergebnisse sehr viel länger dauert.

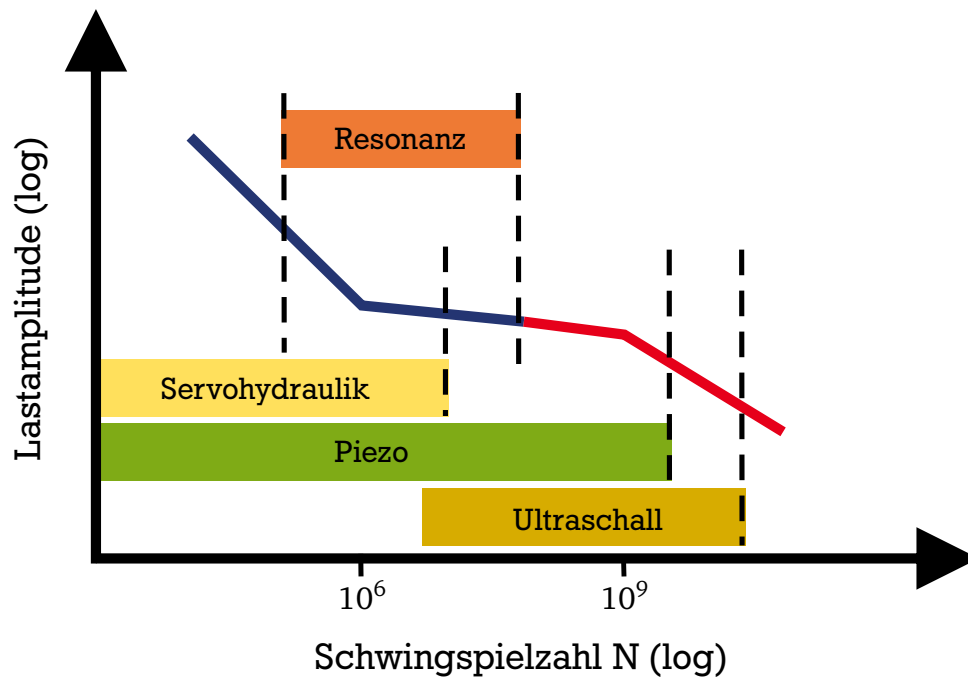


Abbildung 5.6.: Vergleich der Schwingungszahlbereiche in denen die Prüfstände sinnvoll genutzt werden [Lanz14]

Um den Frequenzeinfluss auf das Werkstoffversagen zu untersuchen, wird für die Versuchsergebnisse bei niedriger Prüffrequenz (140 Hz) ein Resonanzpulser verwendet. Prüfergebnisse mit 700 Hz werden mit einem Piezoprüfstand ermittelt. Mit einem Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstand werden zudem Proben bei 20 kHz ermüdet.

Um das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten des Werkstoffes aufnehmen zu können, wird ein servohydraulischer Prüfstand eingesetzt.



6 Auswertung

6.1 Auswertung des Elastizitätsmoduls

Eine zentrale Rolle bei der Auswertung der Versuchsergebnisse spielt der Elastizitätsmodul E . Für die Auswertung des zyklischen Spannungs-Dehnungsverhaltens aber auch für die Umrechnung von spannungsgeregelt aufgenommenen Versuchsergebnissen in Dehnungswerte ist die genaue Bestimmung des Elastizitätsmoduls unverzichtbar. Hierfür ist festzustellen, ob der statisch ermittelte Elastizitätsmodul auch für die Umrechnung von Versuchsergebnissen bei hohen Lebensdauern verwendet werden darf oder ob sich der Elastizitätsmodul über die Lebensdauer verändert.

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls wird auf Basis des Algorithmus von [Hess91] eine Methode zur Ableitung des Elastizitätsmoduls aus den Spannungs-Dehnungs-Hysteresen entwickelt. Untersucht werden der Elastizitätsmodul für die Erstbelastung E_{stat} (statisches Verhalten) und die stabilisierte Hysterese E_{zykl} (zyklisches Verhalten) aus den Versuchsergebnissen der dehnungsgeregelten Versuche, Abbildung 6.1.

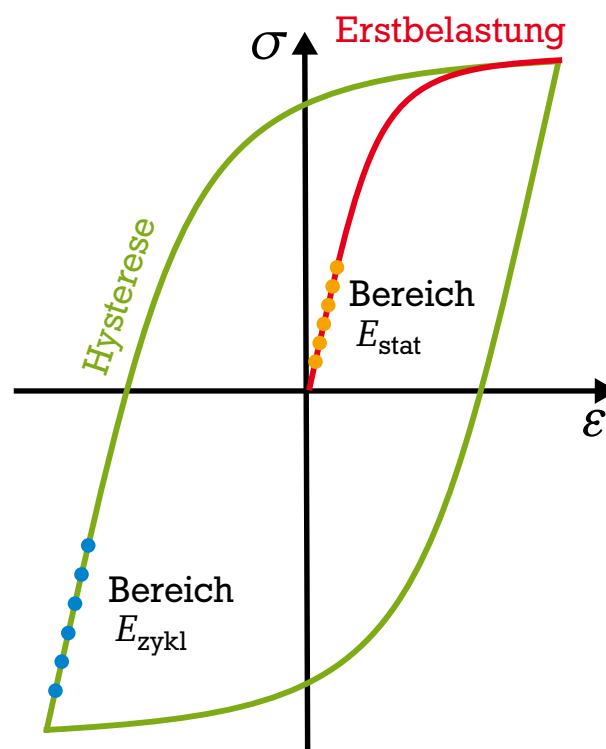


Abbildung 6.1.: Bereiche der stabilisierten Hysterese für die Analyse des statischen und des dynamischen Elastizitätsmoduls

Für die Auswertung werden die Spannungs-Dehnungswerte der Erstbelastungskurve (Abbildung 6.2) und die Spannungs-Dehnungswerte des aufsteigenden Astes der stabilisierten Hysterese (Abbildung 6.3) extrahiert und das Krümmungsverhalten der durch die Spannungs-Dehnungswerte verlaufenden Regressionskurve auf Basis der gleichen Werkstoffprobe analysiert. Je nach Krümmungsrichtung wird entweder der untere oder der obere Messwert der Kurve aus der Regression ausgeschlossen, bis die Kurve auf ihre linearen Anteile (Kreuze in Abbildung 6.2 und 6.3) reduziert wurde.

Der von [Hess91] beschriebene Algorithmus ist für Stähle entwickelt worden und benötigt deshalb Anpassungen auf Aluminiumwerkstoffe. Im Gegensatz zu Stählen besitzt Aluminium keine ausgeprägte Streckgrenze und das Abknicken der HOOKE'schen Geraden beginnt bei weniger festen Aluminiumlegierungen schon bei geringen Belastungen. Zusätzlich ist bei großen Dehnungen im plastischen Bereich ein linear ansteigendes Spannungs-Dehnungsverhalten vorhanden. Dieses kann dazu führen, dass die Kurve von dem Algorithmus auf den linearen Anteil im plastischen Bereich reduziert wird, siehe graue Punkte in Abbildung 6.2. Aus diesem Grund werden die Dehnungen maximal bis zu einer Gesamtdehnungsgrenze $\varepsilon_{t,G} = 0,2\%$ ausgewertet. Am Beispiel des Auslagerungszustands T4 lässt sich der ausgeprägte lineare Bereich und das signifikante Abknicken der Spannungs-Dehnungskurve bzw. des Hystereseastes vor dem Erreichen der Gesamtdehnungsgrenze $\varepsilon_{t,G} = 0,2\%$ deutlich erkennen. Die so definierte Auswertungsgrenze führt dazu, dass der lineare Bereich der elastischen Spannungs-Dehnungskurve durch die Reduzierung der Datenpunkte zuverlässig gefunden wird.

Die Abbruchkriterien des Algorithmus werden jeweils so gewählt, dass ein weiterer Iterationsschritt keine signifikante Änderung am E-Modul zur Folge hat. Dies ist der Fall, wenn das Bestimmtheitsmaß der HOOKE'schen Geraden sehr nahe an 1 liegt oder eine definierte Anzahl an Punkten unterschritten wird. Aus diesem Grund wird neben der Auswertung des Krümmungsverhaltens des kubischen Polynoms auch das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression der HOOKE'schen Geraden ermittelt.

Die Ergebnisse der E-Modul Untersuchung sind in Tabelle A.16 bis A.21 im Anhang zusammengefasst.

Für den unteralterten Zustand T4 zeigt sich für die Auswertung des E-Moduls aus der Erstbelastungskurve ein sehr frühes Krümmen der Spannungs-Dehnungskurve und ein sehr kleiner linearer Bereich. Dies führt zu einer sehr starken Reduktion der Messwerte, sodass eine lineare Regression mit einem Bestimmtheitsmaß nahe 1 einigen Fällen nicht möglich ist. Dies lässt eine zutreffende Bestimmung des Elastizitätsmodul nicht zu. Bei der Auswertung hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse nur plausibel auswertbar sind, die auf mindestens 30 Datenpunkten basierten. Zur Errechnung des mittleren statischen E-Modul E_{stat} werden deshalb nur die Regressionsergebnisse verwendet, deren Regressiongerade auf mindestens 30 Messwertpaaren basiert.

Aufgrund des starken zyklischen Verfestigungsverhalten lässt sich im Zustand T4 der E-Modul aus dem aufsteigenden Ast der Hysterese sehr viel besser bestimmen. Hier kommt es vor, dass sich eine anfängliche, ausgeprägte Hysterese durch die zyklische Verfestigung im stabilisierten Bereich zu einer rein elastischen Gerade verändert, vgl. Abbildung 2.23.

Im Vergleich zur Erstbelastungskurve werden die Hysteresen nur mit der halben Messwertdichte aufgenommen. Somit teilen sich die Gesamtzahl der Datenpunkte statt auf eine Kurve bei der stabilisierten Hysterese auf den kompletten Umfang der Hysterese auf, sodass die Datenpunkte weiter auseinanderliegen. Hierdurch führt auch eine Regression durch 20 Datenpunkte noch zu einem plausiblen Ergebnis. Für die Auswertung werden deshalb im Hystereseast nur die Ergeb-

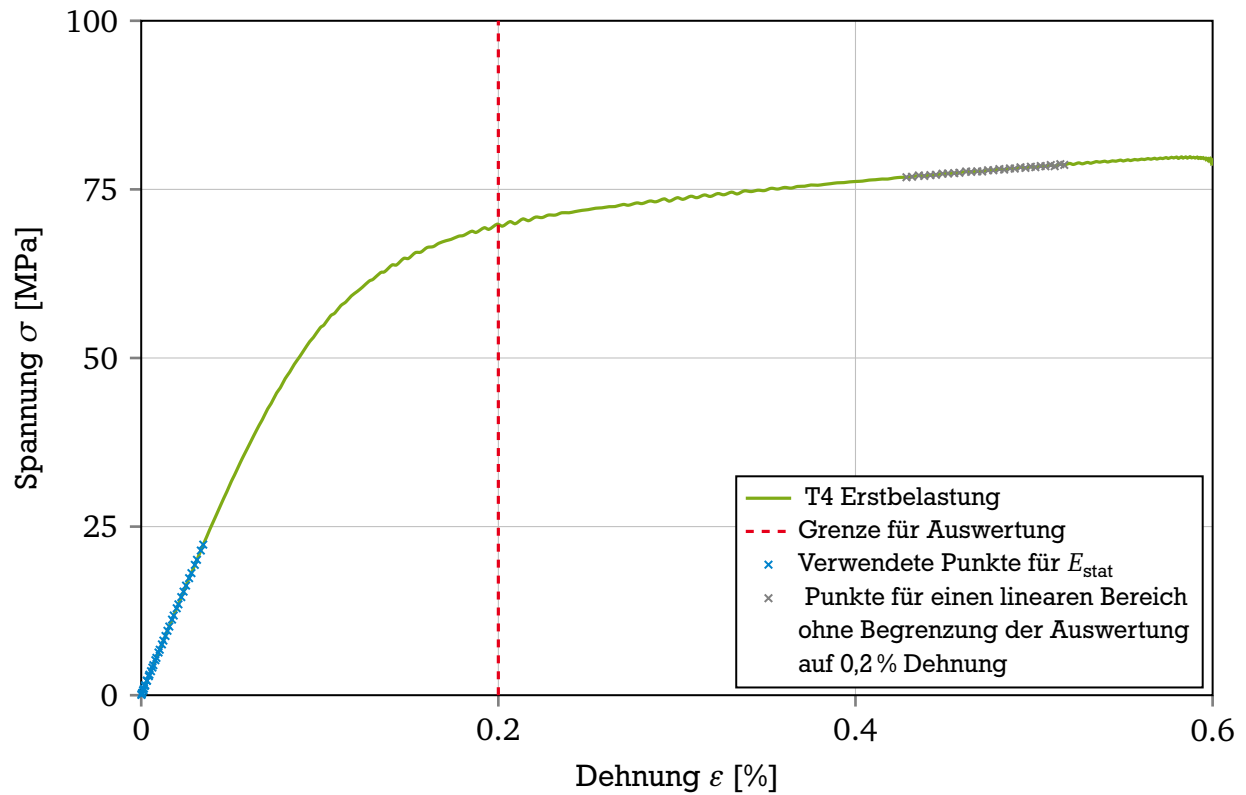


Abbildung 6.2.: Reduzierte Punkte zur Auswertung des E-Moduls der Erstbelastungskurve

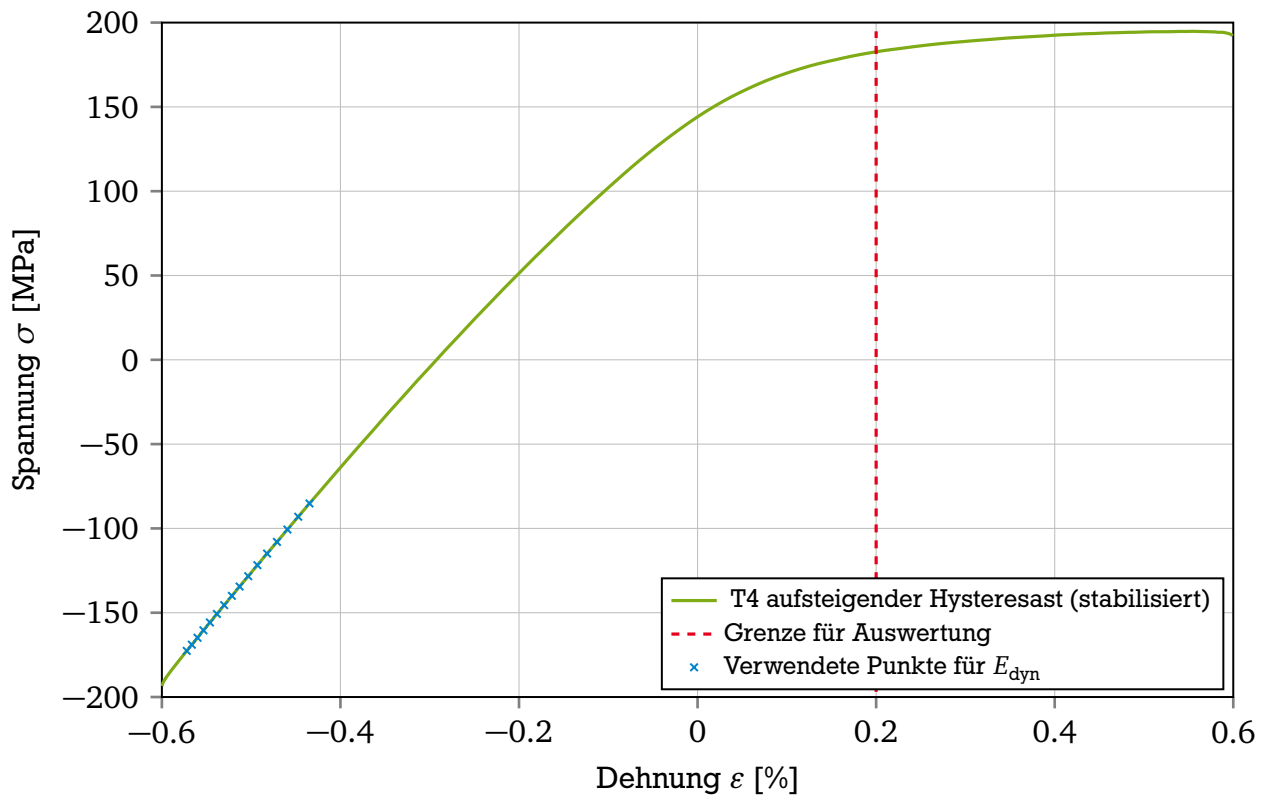


Abbildung 6.3.: Reduzierte Punkte zur Auswertung des E-Moduls der stabilisierten Hysterese

nisse in die Mittelwertberechnung einbezogen, die auf mindestens 20 Messwertpaaren basiert. Diese Kriterien werden ebenfalls für die Mittelwertsbestimmung des E-Moduls der Zustände T6 und T7 angewendet.

Der maximal ausgelagerte Zustand T6 zeigt sowohl in der Erstbelastungskurve als auch in der stabilisierten Hysterese einen ausgeprägten elastischen Bereich, sodass zur Ableitung des E-Moduls genügend Messwerte zur Verfügung stehen.

Im überalterten Zustand T7 steht für die Bestimmung des statischen E-Moduls aus der Erstbelastung ein ausreichend großer elastischer Bereich in der Hysterese zur Verfügung. Bei der Bestimmung des zyklischen E-Moduls zeigt sich für diesen Zustand ein etwas geringerer Elastizitätsmodul. Gerade bei hohen Dehnungsamplituden zwischen $\varepsilon_{a,t} = 0,4\%$ und $0,6\%$ zeigt sich ein deutlicher Abfall von bis zu 7 GPa im Bereich der stabilisierten Hysterese.

Die so ermittelten Mittelwerte der Elastizitätsmodule, sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1.: Mittelwerte der Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche mit Standardabweichung

	E_{stat} [GPa]	E_{zykl} [GPa]
T4	$64,20 \pm 0,38$	$63,79 \pm 0,40$
T6	$64,38 \pm 0,41$	$63,63 \pm 1,24$
T7	$64,16 \pm 0,37$	$61,07 \pm 2,14$

Aus den Versuchen zeigt sich bei betrachten der Standardabweichung keine starke Abweichung des statischen und zyklischen Elastizitätsmoduls für die Zustände T4 und T6. Für die Auslagerungszustände T4 und T6 lässt sich für die Erstbelastung und den stabilisierten Zustand ein E-Modul von $E = 64$ GPa bestimmen. Dies ist in Übereinstimmung mit [Hopp95], die für zyklische Untersuchungen des ENAW-6060 für den Zustand T4 $E = 65$ GPa und für den Zustand T6 $E = 66$ GPa verwendeten. Vergleichbare Legierungen wie z.B. die Aluminiumlegierung EN AW-6082 zeigen laut [Boll87] ebenfalls einen Elastizitätsmodul im Bereich von $E = 64$ GPa.

Für die Abweichung der E-Modulauswertung des Zustands T7 beim zyklischen E-Modul zeigt sich bei näherer Betrachtung, dass dieser Abfall nicht mit einer tatsächlichen zyklischen Änderung des E-Moduls zusammenhängt. Vielmehr lässt sich der Abfall des E-Moduls mit einem Abfall der Steifigkeit durch Mikrorissbildung erklären. Selbst bei niedrigen Spannungsamplituden lassen sich beim Zustand T7 Mikrorisse über den kompletten Probenquerschnitt feststellen, die zu einer Schwächung der Probe während des Ermüdungszeitraums führen und in der Auswertung der stabilisierten Hysterese als scheinbare Änderung des E-Moduls wahrgenommen werden [Fisc14a], siehe Abbildung A.1 c im Anhang.

Deshalb wird auch für den Zustand T7 für die weiteren Auswertungen der statische E-Modul $E = 64$ GPa verwendet, der sehr gut mit dem E-Modul der beiden anderen Zustände, T4 und T6 übereinstimmt.

6.2 Zyklisches Materialverhalten EN AW-6060

Zur Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens der verschiedenen Auslagerungszustände der Aluminiumlegierung EN AW-6060 gilt es zu klären, welches Modell zur Beschreibung der Dehnungswöhlerlinie verwendet werden sollte. Die Versuchsergebnisse der dehnungsgeregelten Versuche werden hierzu nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und dem tri-linearen Konzept ausgewertet. Die Ergebnisse sind im Anhang A.4 zusammengefasst.

6.2.1 Vergleich der Dehnungswöhlerlinienmodelle

Zum Vergleich der Wöhlerlinienmodelle werden die Regressionensgeraden der elastischen Anteile der dehnungsgeregelten Versuchspunkte zum einen mit Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN zum anderen mit dem tri-linearen Konzept und deren Einfluss auf die Dehnungswöhlerlinie betrachtet. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt, welche Auswertungsmethode die Versuchsergebnisse besser annähert und somit für die Auswertung besser geeignet ist, das zyklische Werkstoffverhalten zu beschreiben.

Werden für den Auslagerungszustand T4 nur die elastischen Dehnungsanteile im doppeltlogarithmischen Diagramm über der Schwingspielzahl aufgetragen, Abbildung 6.4, können die Regressionensgeraden für die elastischen Dehnungsanteile nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und tri-linear verglichen werden.

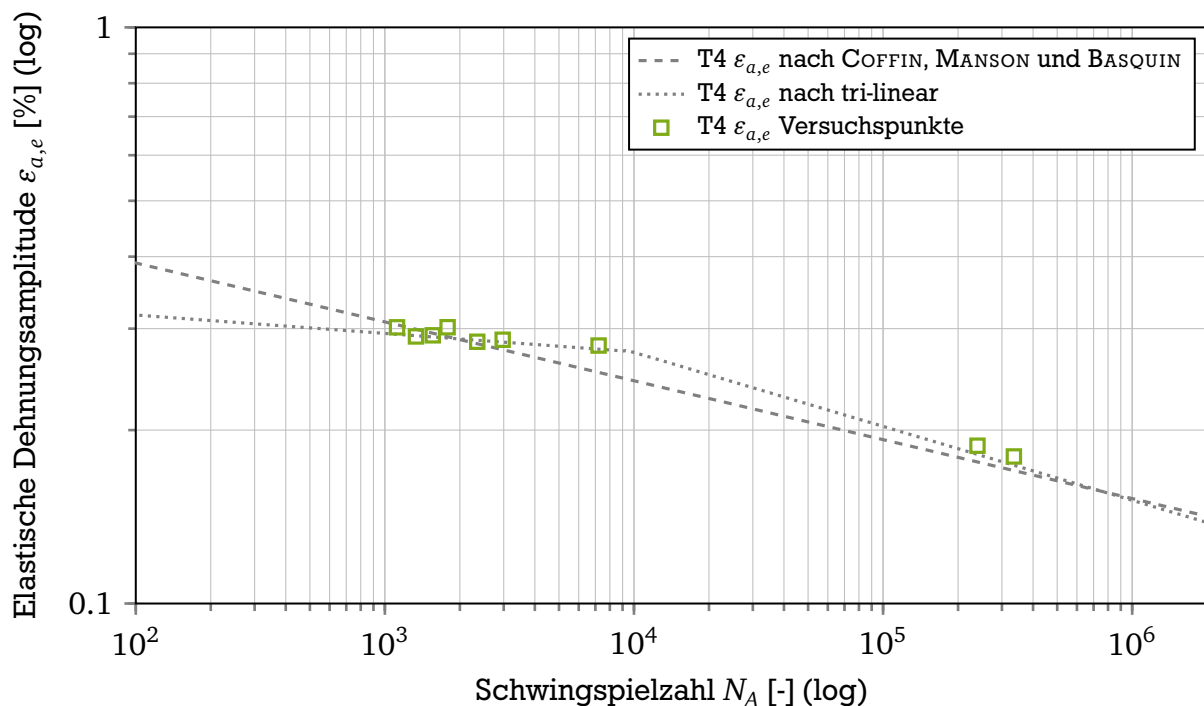


Abbildung 6.4.: Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und nach dem tri-linearen Konzept für den Auslagerungszustand T4

Zwischen den beiden Auswertungsmethoden lässt sich für den Zustand T4 ein deutlicher Unterschied feststellen. Im Gegensatz zu der Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN, die eine Neigung von $b = -0,1022$ zeigt, führt die trilineare Auswertung im ersten Bereich mit einer Neigung von $b_1 = -0,0319$ zu einem sehr viel flacheren Verlauf der Regressionensgeraden

und knickt danach bei einer Anrisschwingenspielzahl von $N_A = 10^4$ zu einem steileren Verlauf, $b = -0,1283$ ab. Die Versuchspunkte der elastischen Dehnungsanteile werden im ersten Bereich der tri-linearen Auswertung sehr viel besser getroffen als durch die Regressionsgerade nach COFFIN, MANSON und BASQUIN. Dies zeigt die Streubreite mit $T_{\varepsilon_{a,e}} = 1,058$ für den ersten Bereich der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie, die verglichen mit der Streubreite bei der Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN $T_{\varepsilon_{a,e}} = 1,095$ etwas kleiner ist, Tabelle 6.2. Eine Aussage über die Streubreite im zweiten Bereich der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie ist aufgrund von lediglich drei Punkten in diesem Bereich nicht möglich. Die Auswertung zeigt, dass die tri-lineare Auswertung für den Zustand T4 den Verlauf der Ausgleichsgeraden der elastischen Dehnungsanteile besser wieder gibt.

Tabelle 6.2.: Vergleich der einzelnen Streuungen der Versuchspunkte bei Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN (C. M. & B.) und der Bereiche 1 und 2 der tri-linearen Wöhlerlinie für den Zustand T4

	C. M. & B.	Bereich 1	Bereich 2
$T_{\varepsilon_{a,e}}$	1,095	1,058	(1,005)
b	-0,1022	-0,0319	-0,1283

Durch die Summation von elastischen und plastischen Dehnungsanteilen haben diese unterschiedlichen Auswertungsmethoden der elastischen Anteile einen Einfluss auf die Darstellung der Dehnungswöhlerlinie, Abbildung 6.5.

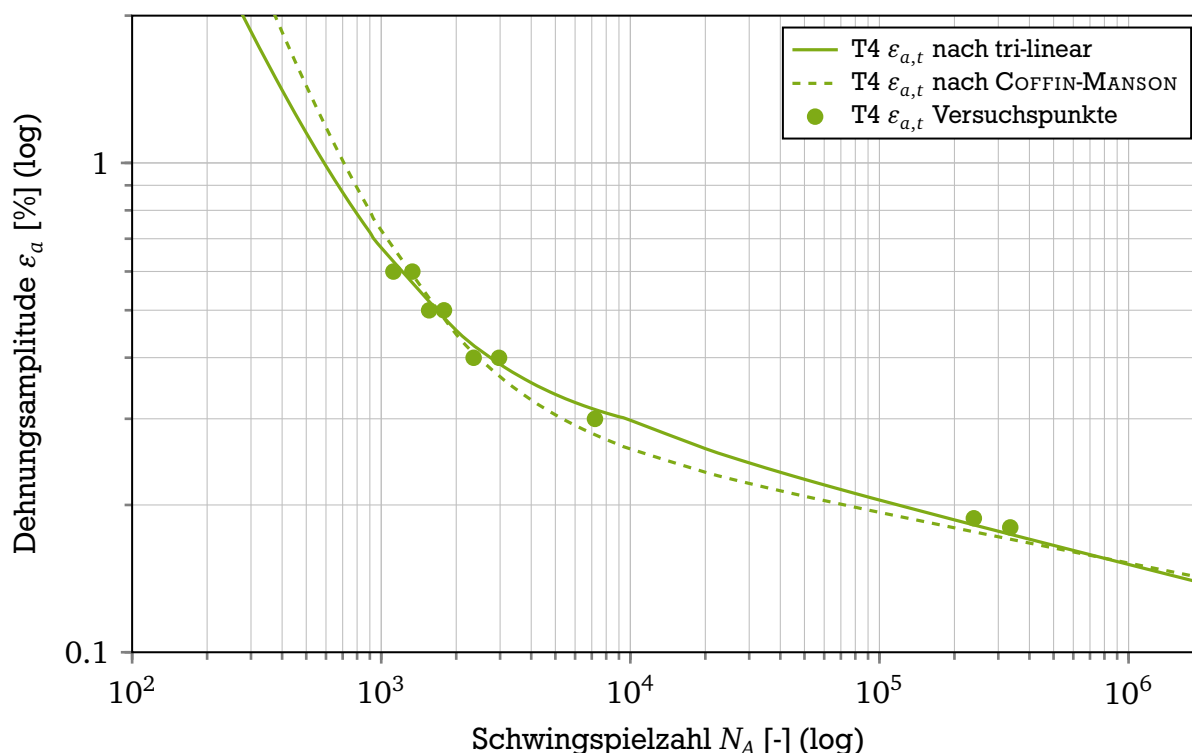


Abbildung 6.5.: Vergleich Gesamtdehnungswöhlerlinie ausgewertet nach tri-linear und COFFIN, MANSON, BASQUIN für den Auslagerungszustand T4

So zeigt die Dehnungswöhlerlinie für den Zustand T4 nach dem tri-linearen Konzept im mittleren Bereich von $N = 3 \cdot 10^3$ bis $N = 2 \cdot 10^5$ ein Abknicken und eine Beanspruchbarkeit mit

höheren Dehnungsamplituden an als durch den Ansatz von COFFIN, MANSON und BASQUIN zu erwarten wäre. Im gesamten Bereich der Versuchsergebnisse trifft die Dehnungswöhlerlinie nach dem tri-linearen Konzept die Versuchspunkte der Gesamtdehnungsanteile genauer als nach dem Ansatz von COFFIN, MANSON und BASQUIN.

Werden die tri-lineare Auswertung der elastischen Dehnungsanteile und die Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN für den Zustand T6 angewendet, kann nach der tri-linearen Auswertung ebenfalls ein Abknicken der Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile mit den Neigungen $b_1 = -0,0539$ und $b_2 = -0,1154$ festgestellt werden. Das Abknicken der Regressionsgeraden ist für den Auslagerungszustand T6 aber im Vergleich zur Neigung der Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN mit einer Neigung von $b = -0,0851$ nicht so deutlich wie beim Auslagerungszustand T4 zu erkennen, Abbildung 6.6. Die Streubreiten sind bei der tri-linearen Auswertung ebenfalls deutlich geringer als bei der Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN, Tabelle 6.3.

Tabelle 6.3.: Vergleich der einzelnen Streuungen der Versuchspunkte bei Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN (C. M. & B.) und der Bereiche 1 und 2 der tri-linearen Wöhlerlinie für den Zustand T6

	C. M. & B.	Bereich 1	Bereich 2
$T_{\varepsilon_{a,e}}$	1,100	1,028	1,012
b	-0,0851	-0,0539	-0,1154

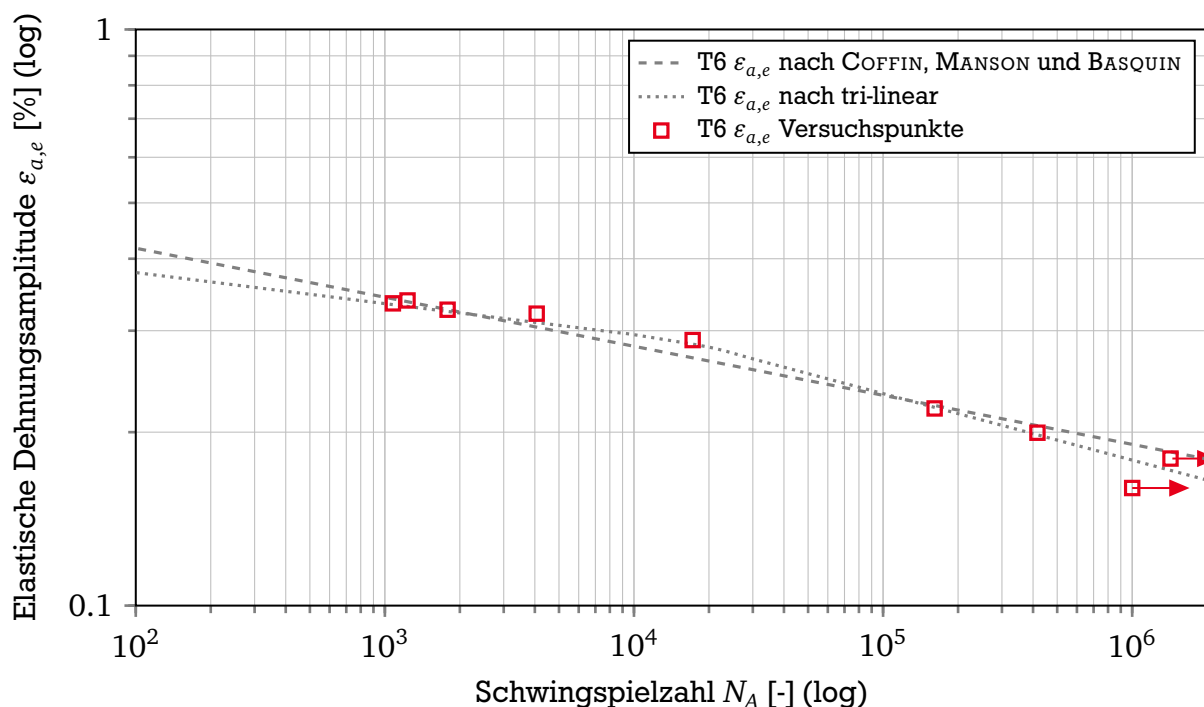


Abbildung 6.6.: Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und nach dem tri-linearen Konzept für den Auslagerungszustand T6

Wird die Dehnungswöhlerlinie für den Zustand T6 sowohl nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und nach dem tri-linearen Konzept aufgestellt, zeigen sich nur leichte Unterschiede zwischen den beiden Dehnungswöhlerlinien. Auch beim Zustand T6 lässt sich nach Auswertung mit dem

tri-linearen Konzept im mittleren Bereich von $N = 3 \cdot 10^3$ bis $N = 1 \cdot 10^5$ durch das bis zum Erreichen des stabilisierten Zustandes transiente Werkstoffverhalten ein höherer Verlauf der elastischen Dehnungswöhlerlinie erkennen. Im weiteren Verlauf fällt die Dehnungswöhlerlinie für den Zustand T6 nach dem tri-linearen Konzept stärker ab als nach dem Ansatz von COFFIN, MANSON und BASQUIN, Abbildung 6.7. Die Versuchspunkte der Gesamtdehnungsanteile werden dadurch mit der Auswertung nach dem tri-linearen Konzept für den Zustand T6 etwas besser approximiert.

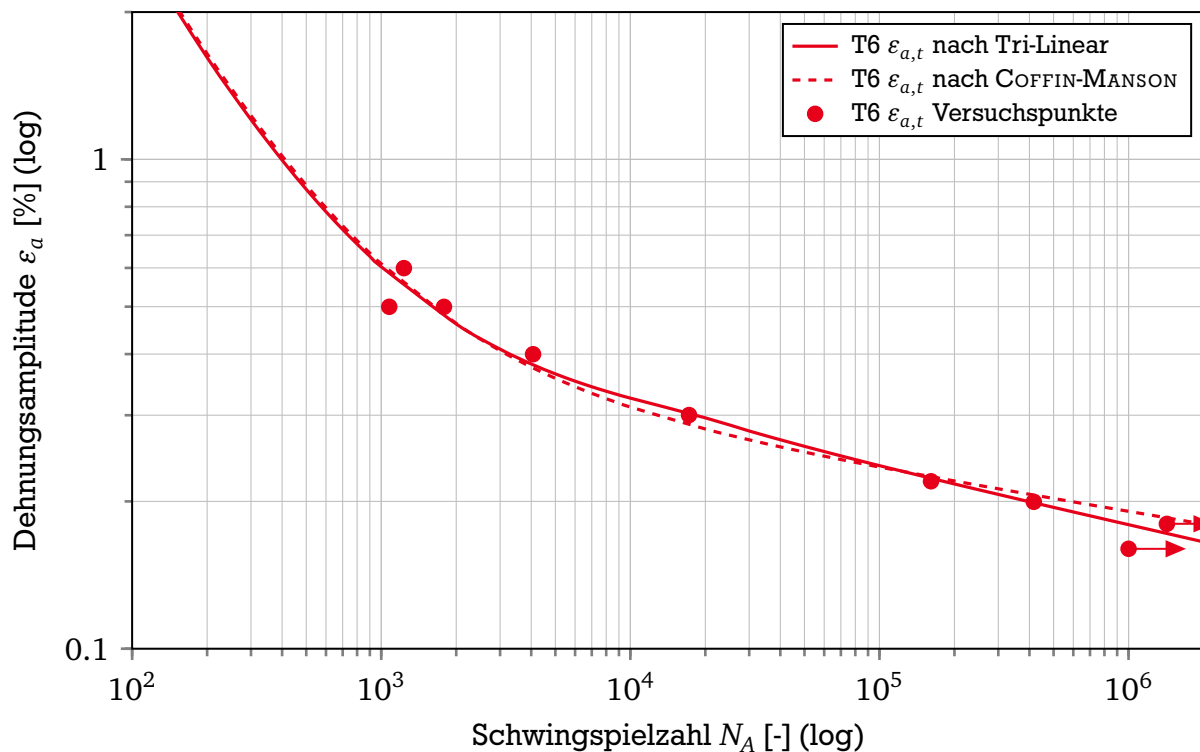


Abbildung 6.7.: Vergleich Gesamtdehnungswöhlerlinie ausgewertet nach tri-linear und COFFIN, MANSON, BASQUIN für den Auslagerungszustand T6

Die Regressionsgeraden der elastischen Anteile der Auslagerungszustands T7 zeigen keine großen Unterschiede zwischen der Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und nach dem tri-linearen Konzept. Die Neigungen und Streubreiten liegen für beide Auswertungsmethoden im gleichen engen Bereich, Tabelle 6.4.

Tabelle 6.4.: Vergleich der einzelnen Streuungen der Versuchspunkte bei Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN (C. M. & B.) und der Bereiche 1 und 2 der tri-linearen Wöhlerlinie für den Zustand T7

	C. M. & B.	Bereich 1	Bereich 2
$T_{\varepsilon_{a,e}}$	1,044	1,022	1,052
b	-0,0479	-0,0515	-0,0662

Es kann somit kein Abknicken der elastischen Dehnungsanteile im Bereich zwischen $N = 3 \cdot 10^3$ bis $N = 1 \cdot 10^5$ festgestellt werden, Abbildung 6.8.

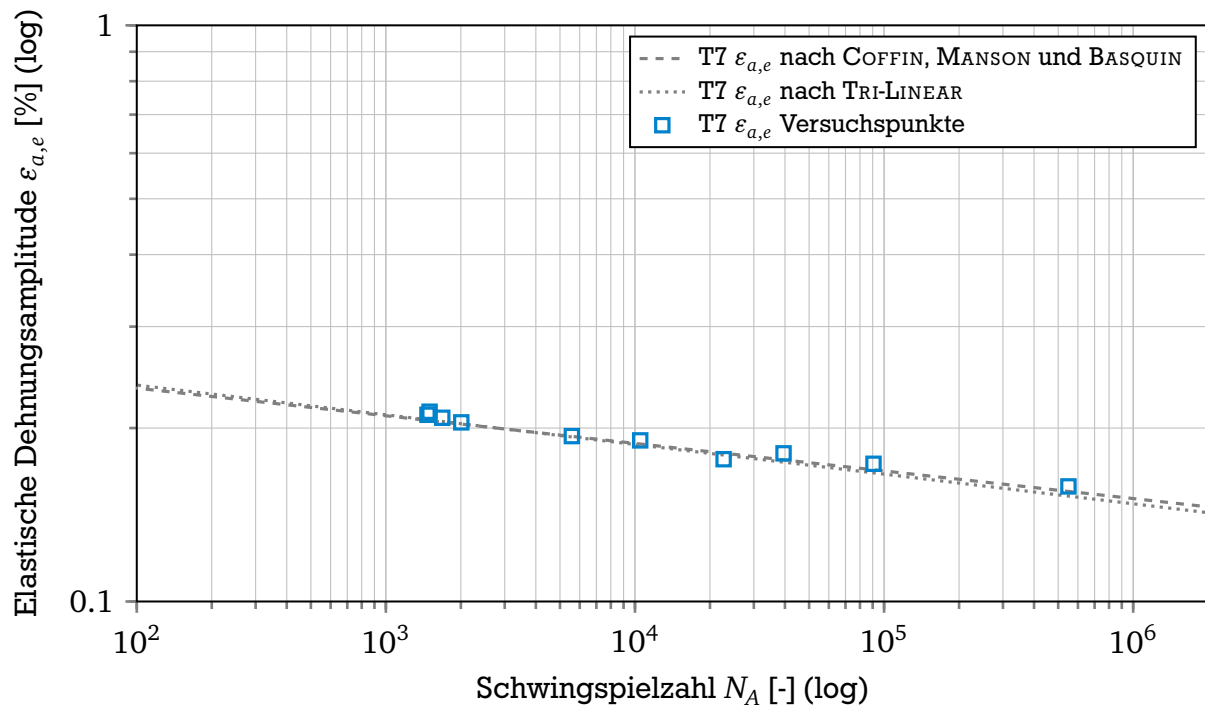


Abbildung 6.8.: Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und nach dem tri-linearen Konzept für den Auslagerungszustand T7

Im Zustand T7 lässt sich deswegen auch kein Unterschied zwischen dem tri-linearen Konzept und dem Ansatz von COFFIN, MANSON und BASQUIN in der Dehnungswöhlerlinie ausmachen. Beide Ansätze approximieren die Versuchspunkte der Gesamtdehnung gleich gut, Abbildung 6.9.

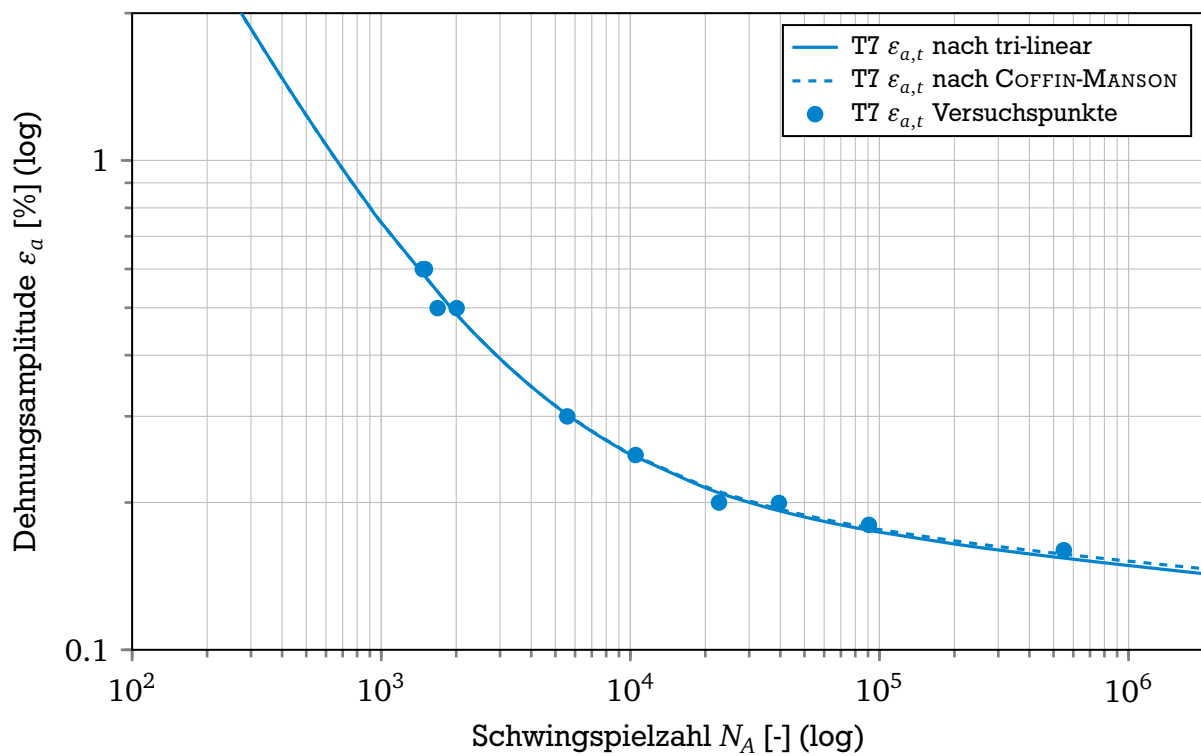


Abbildung 6.9.: Vergleich Gesamtdehnungswöhlerlinie ausgewertet nach tri-linear und COFFIN, MANSON, BASQUIN für den Auslagerungszustand T7

6.2.2 Ableitung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurven

Durch Ableitung des zyklischen Spannungs-Dehnungsverhaltens lassen sich die Auswirkungen der transienten, zyklischen Werkstoffeffekte im Vergleich zu dem quasi-statischen Materialverhalten darstellen und ein Ver- bzw. Entfestigungsverhalten quantifizieren, indem die quasistatische Erstbelastungskurve und die zyklische Spannungs-Dehnungskurve im selben Diagramm aufgetragen werden. Aus den Dehnungswöhlerlinien nach COFFIN, MANSON und BASQUIN werden die zyklischen Spannungs-Dehnungskurven nach RAMBERG-OSGOOD über die Kompatibilitätsbedingungen, Gleichungen 2.23 und 2.24, abgeleitet. Wenn Kompatibilität für den untersuchten Werkstoff gilt, lässt sich das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten mit Hilfe der Kompatibilitätsbedingungen auf die Versuchspunkte abbilden. Für einige Werkstoffe führt die Ableitung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve mit Hilfe der Parameter aus der Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN, MANSON und BASQUIN nicht zu einer zufriedenstellenden Abbildung des zyklischen Spannungs-Dehnungsverhaltens auf die Versuchspunkte. Ist dies der Fall kann die tri-lineare Auswertung für die Dehnungswöhlerlinie verwendet werden. Hierbei werden die Kompatibilitätsbedingungen nur auf den ersten Abschnitt der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie angewendet, Gleichungen 2.28 und 2.29.

Für die untersuchten Zustände wird deshalb geprüft, mit Hilfe welcher Kompatibilitätsbedingungen die Versuchsergebnisse besser beschrieben werden können

Für den Zustand T4 zeigt die mit Hilfe der Kompatibilitätsbedingungen des tri-linearen Konzepts abgeleitete zyklische Spannungs-Dehnungskurve eine deutlich bessere Treffsicherheit der Versuchspunkte als die aus der Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN, MANSON und BASQUIN abgeleitete Spannungs-Dehnungskurve, Abbildung 6.10. Der Zustand T4 zeigt unter zyklischer Belastung eine enorme zyklische Verfestigung. So steigt die Ersatzdehngrenze im Vergleich zur statischen Ersatzdehngrenze $R_{p0,01} = 54 \text{ MPa}$ im zyklischen Versuch auf $R'_{p0,01} = 171 \text{ MPa}$ und liegt damit sogar noch über der Zugfestigkeit von $R_m = 161 \text{ MPa}$, Abbildung 6.14.

Auch für den Zustand T6 zeigt die Auswertung nach dem tri-linearen Ansatz eine bessere Treffsicherheit der Versuchspunkte als die aus der Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN, MANSON und BASQUIN abgeleitete Spannungs-Dehnungskurve. Im Gegensatz zum Zustand T4 zeigt sich beim Zustand T6 eine leichte zyklische Entfestigung, vgl. Abbildung 6.14, im Bereich von $\varepsilon_{a,t} = 0,3 \%$ bis $\varepsilon_{a,t} = 0,5 \%$ Gesamtdehnungsamplitude, Abbildung 6.11.

Die zyklischen Spannungs-Dehnungskurven abgeleitet nach tri-linear und nach COFFIN, MANSON und BASQUIN des Zustands T7 unterscheiden sich nicht, Abbildung 6.12. Es ist nur ein leichter Unterschied zwischen der quasi-statischen und der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve erkennbar. Der Zustand T7 zeigt demnach ein leicht verfestigendes, zyklisches Spannungs-Dehnungsverhalten. Dies ist auch in der im Vergleich zur statischen Ersatzstreckgrenze um 14 MPa höheren zyklischen Ersatzstreckgrenze zu erkennen, vgl. Abbildung 6.14.

Wird das zyklische und das quasi-statische Spannungs-Dehnungsverhalten der einzelnen Zustände miteinander verglichen, zeigt sich, dass die quasi-statischen Festigkeiten für die Beschreibung des Werkstoffes unter zyklischer Belastung nicht ausreichen. So liegt die quasi-statische Festigkeit des Wärmebehandlungszustands T4 im Bereich von $\varepsilon = 0,5 \%$ um 50 MPa unter der quasi-statischen Festigkeit des Zustand T7 und um 132 MPa unter der quasi-statischen Festigkeit des Zustands T6. Durch eine starke zyklische Verfestigung, die schon bei geringen Dehnungsamplituden von unter 0,1 % eintritt, liegen die zyklischen Werkstoffkennwerte des Zustands T4 um

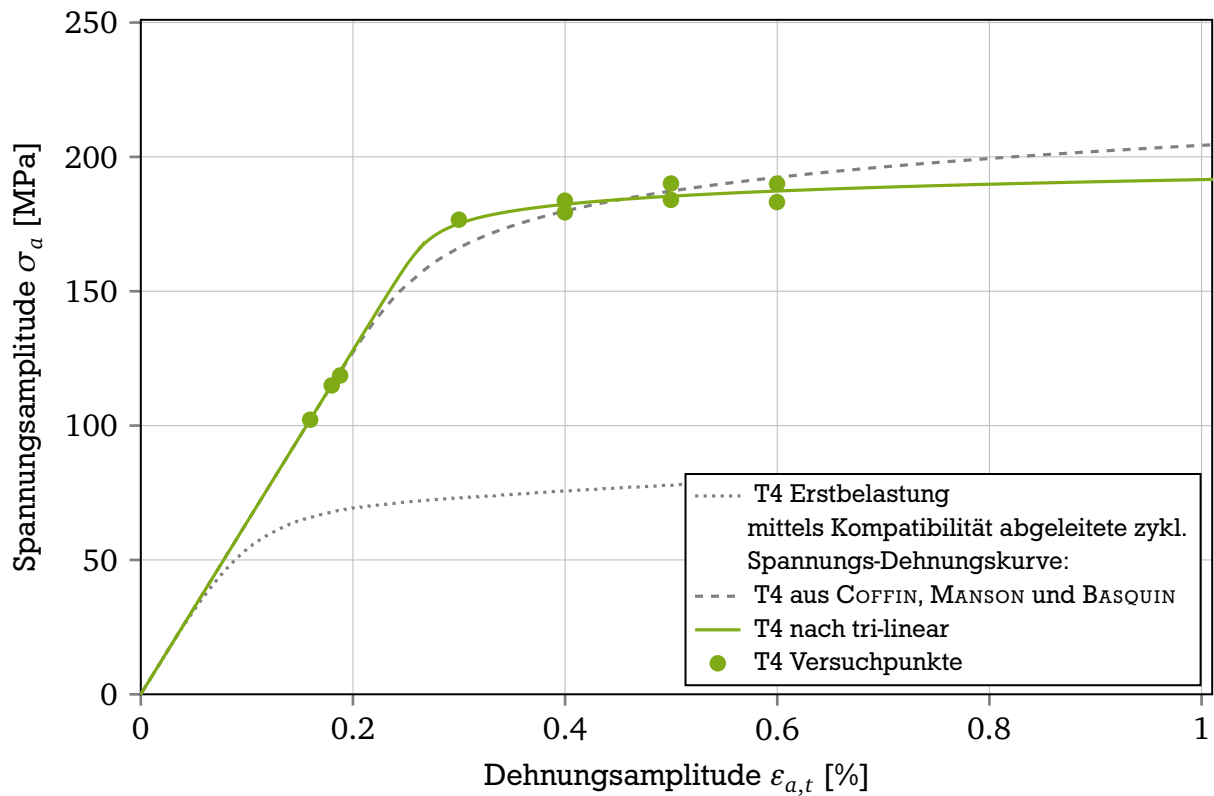


Abbildung 6.10.: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven für EN AW-6060 T4

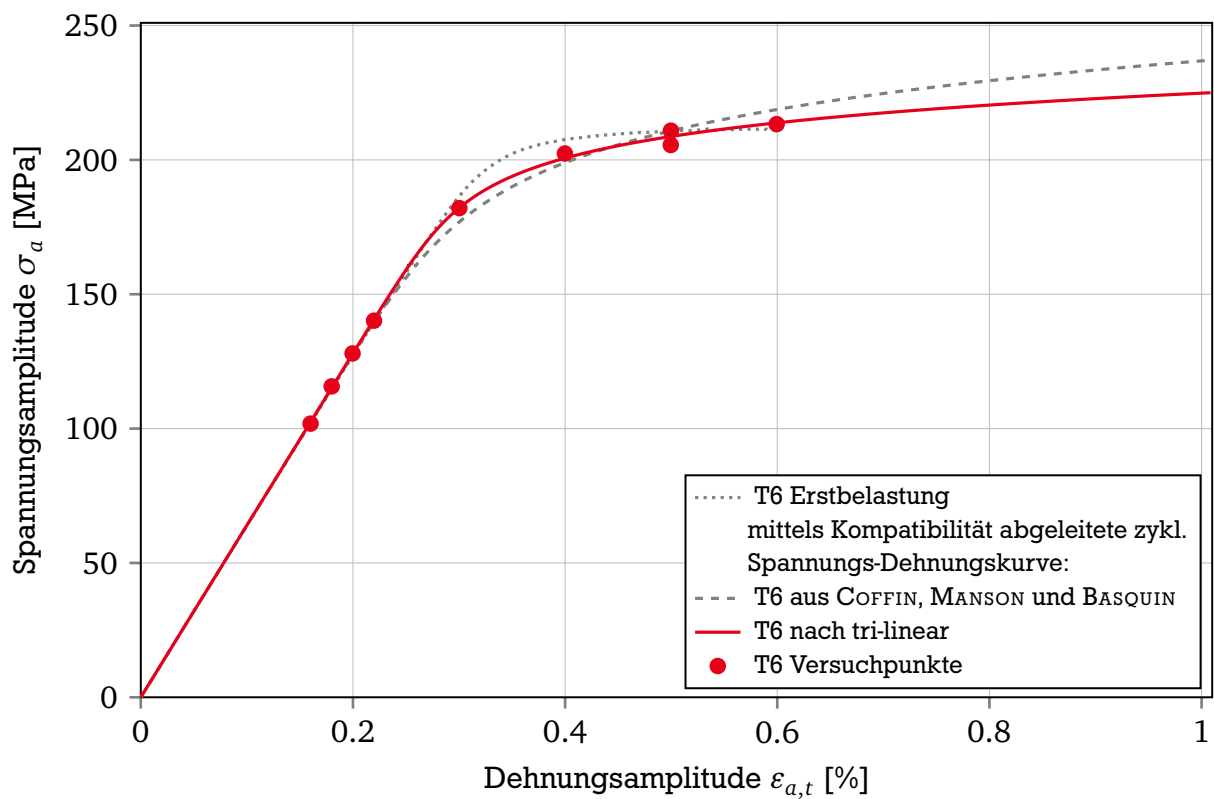


Abbildung 6.11.: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven für EN AW-6060 T6

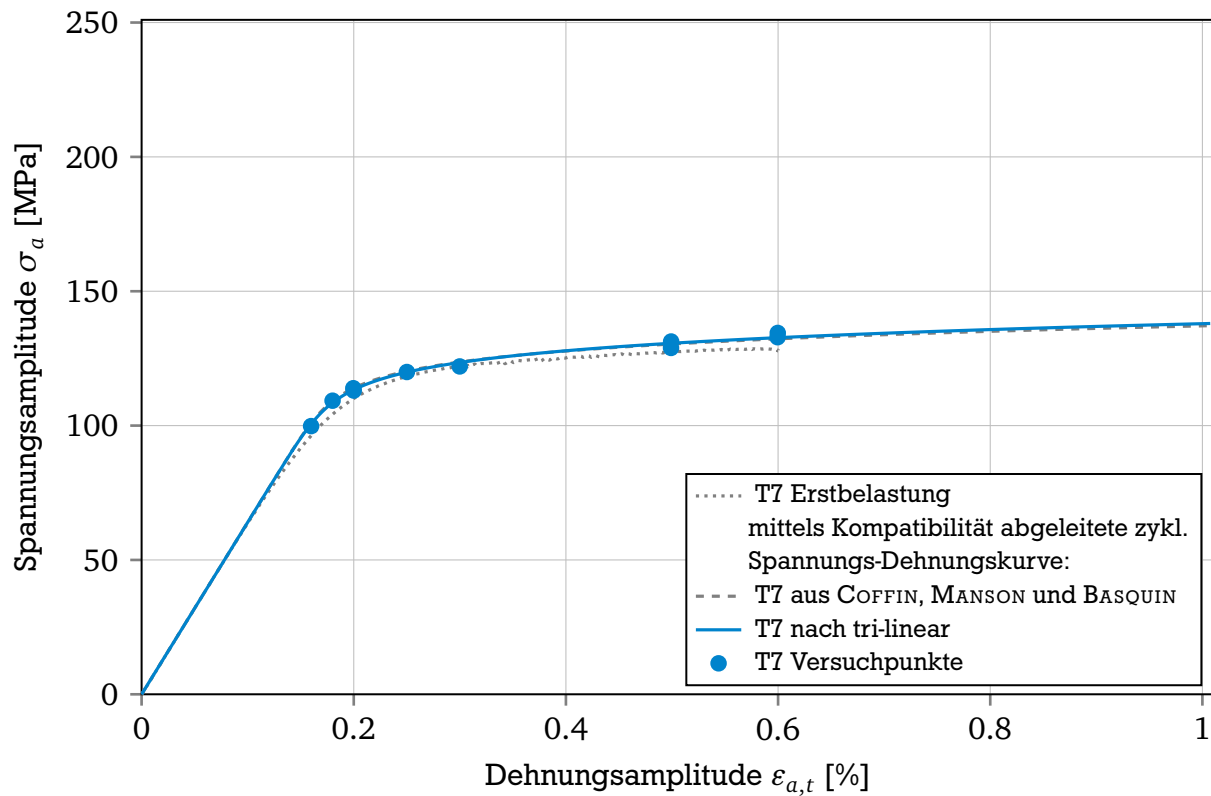


Abbildung 6.12.: Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven für EN AW-6060 T7

57 MPa höher als die des Zustands T7 und liegen nur noch 25 MPa niedriger als die Spannung des zyklischen Spannungs-Dehnungsverhaltens des Zustand T6, Abbildung 6.13.

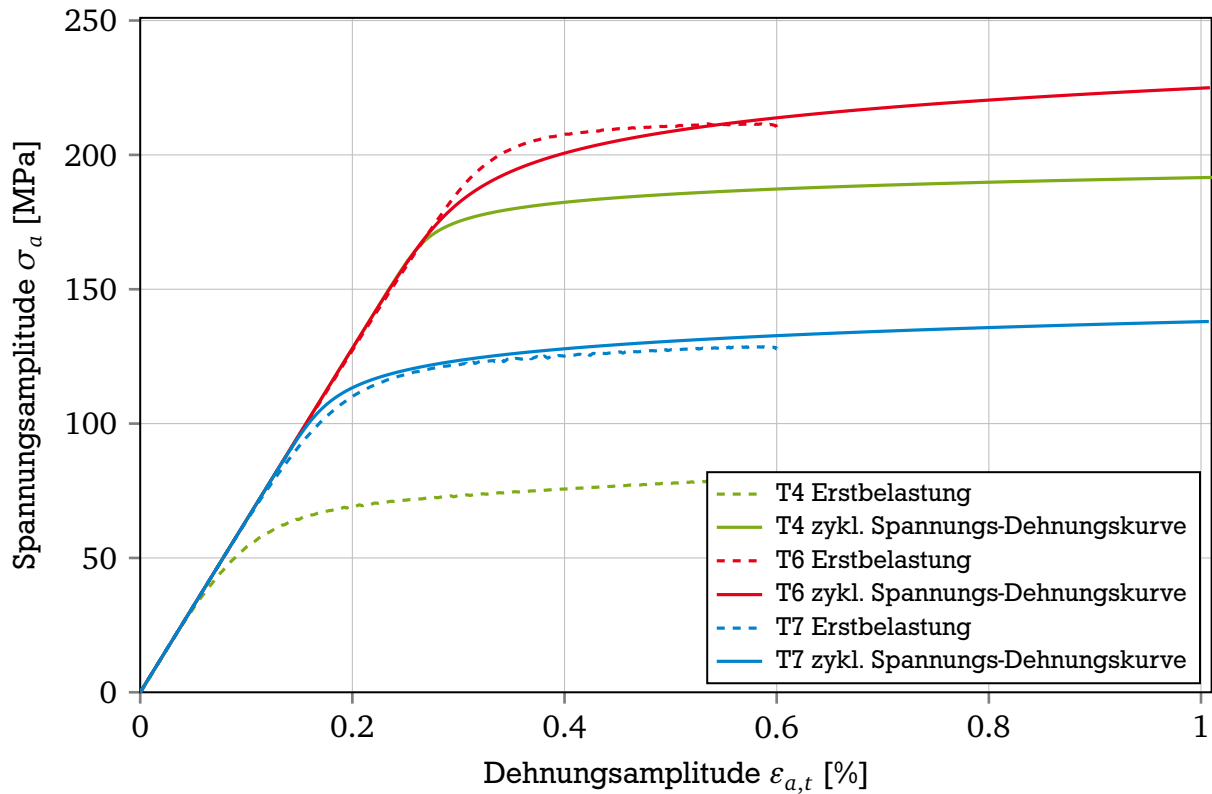


Abbildung 6.13.: Spannungs-Dehnungskurven für EN AW-6060 der Zustände T4, T6, T7

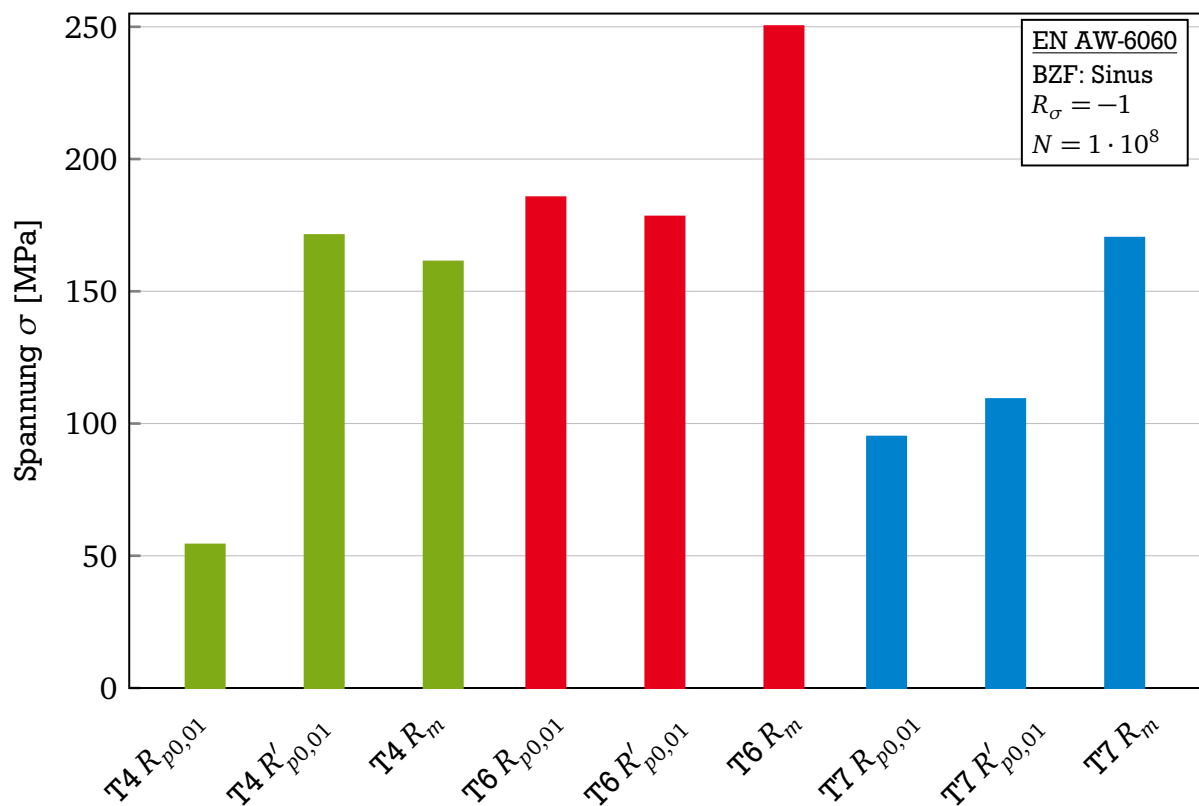


Abbildung 6.14.: Vergleich von statischer ($R_{p0,01}$) und zyklischer ($R'_{p0,01}$) Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgeregelten Versuchen und der Zugfestigkeit R_m aus dem Zugversuch

6.2.3 Fazit zyklisches Werkstoffverhalten EN AW-6060

Das zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten ist abhängig vom Auslagerungszustand und unterscheidet sich zum quasi-statischen Spannungs-Dehnungsverhalten. Dies deckt sich mit den in [Hopp95] vorgestellten Ergebnissen, die ebenfalls ein stark verfestigendes Werkstoffverhalten des Auslagerungszustandes T4 und ein leicht entfestigendes Werkstoffverhalten des Zustandes T6 der Aluminiumlegierung EN AW-6060 zeigen und bestätigen die Aussage der neu ermittelten Ergebnisse zum transienten Werkstoffverhalten bei den verschiedenen Wärmebehandlungszuständen.

Je stärker transiente Effekte bei zyklischer Beanspruchung auftreten und so das zyklische Werkstoffverhalten beeinflussen, desto größer ist die Abweichung des statischen und zyklischen Spannungs-Dehnungsverhaltens. Die Auswertung der dehnungsgeregelten Versuchsergebnisse und Aufstellung der Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und das daraus über die Kompatibilitätsbedingungen abgeleitete zyklische Spannungs-Dehnungsverhalten weicht bei Unterschieden zwischen dem statischen und dem zyklischen Spannungs-Dehnungsverhalten umso stärker von den gemessenen Versuchspunkten ab, je stärker das Werkstoffverhalten durch transiente Effekte beeinflusst wird.

Demgegenüber kann die Auswertung nach dem tri-linearen Dehnungswöhlerlinien-Konzept für die Bereiche 1 und 2 eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielen. Dabei kann die Methode bei transientem und konstantem Werkstoffverhalten gleich gut eingesetzt werden.

Für die Auswertung von dehnungsgeregelten Versuchen wird deshalb die Auswertung nach dem tri-linearen Konzept empfohlen, da diese sowohl bei stark transientem Werkstoffverhalten die Abbildung des zyklischen Werkstoffverhaltens auf die Versuchspunkte leistet und bei wenig transientem Werkstoffverhalten vergleichbare Ergebnisse zur Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN erzielt.

Die Auswertungsergebnisse sind im Anhang in den Tabellen A.10 bis A.15 und in den Abbildungen A.4 bis A.12 im Detail dargestellt.

Dehnungsgeregelte Versuche werden nur in Lastbereichen in denen plastischen Dehnungsanteile auftreten eingesetzt. In der Regel werden diese Versuche nur bis zu einer Schwingspielzahl von $N = 10^6$ Schwingspielen durchgeführt, da bei rein elastischen Dehnungsamplituden kein Mehrwert aus den Versuchen gewonnen werden kann. Eine Bewertung des 3. Bereichs der tri-linearen Wöhlerlinie ist deshalb mit dehnungsgeregelten Versuchen nicht sinnvoll.

6.3 Schwingfestigkeit im Langzeitfestigkeitsbereich

Zur Untersuchung des Frequenzeinflusses auf die Schwingfestigkeit der Aluminiumlegierung EN AW-6060 im Langzeitfestigkeitsbereich sind für die einzelnen Wärmebehandlungszustände axiale Schwingfestigkeitsversuche mit dem Lastverhältnis $R = -1$ durchgeführt worden. Die Versuchsfrequenz lag dabei je nach Prüfsystem bei 140 Hz (Resonanzprüfstand), 700 Hz (Piezoprüfstand) und 20 kHz (Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstand). Die Belastungen wurden so gewählt, dass Versagen im Schwingspielzahlbereich von 10^6 bis 10^9 auftrat. Die einzelnen Ergebnisse sind in Tabelle A.2 bis A.9 im Anhang zusammengefasst.

Werden die Schwingfestigkeitsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche in einem Wöhlerdiagramm eingetragen, Abbildungen 6.15 und 6.16, deutet sich für alle Auslagerungszustände und alle Versuchsfrequenzen eine gleiche Neigung der einzelnen Wöhlerlinien an.

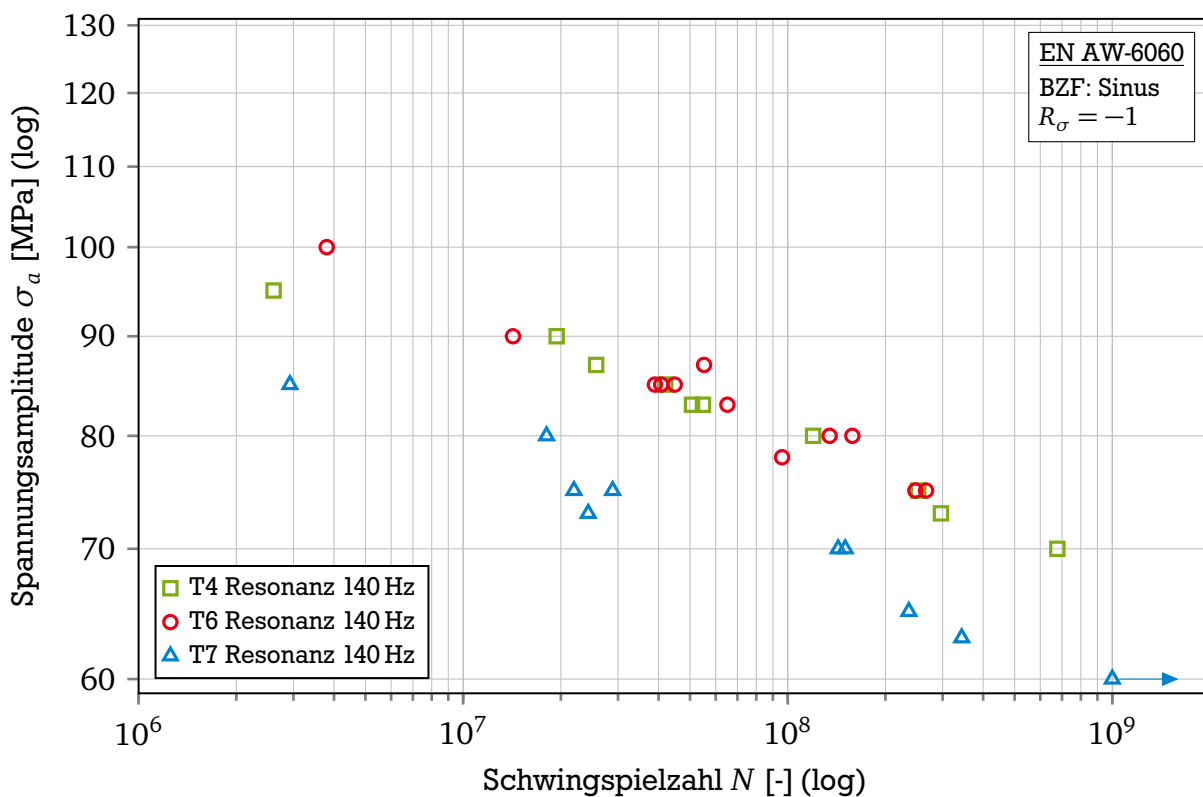


Abbildung 6.15.: Punkte der Versuchsergebnisse des Resonanzpulsers bei 140 Hz Versuchsfrequenz im Wöhlerdiagramm dargestellt

Im Stand der Technik werden ebenfalls für den Langzeitfestigkeitsbereich konstante Neigungen der Wöhlerlinie vorgeschlagen. So wird in [Sons05] $k^* = 22$ und in [FKM12] eine Neigung von $k^* = 15$ bis zu einer Schwingspielzahl von $N_G = 10^8$ empfohlen. In [FKM12] wird die Wöhlerlinie für Schwingspielzahlen $N_G > 10^8$ waagrecht weitergeführt.

Eine entsprechende Untersuchung mit den jeweiligen Neigungen für [Sons05] und [FKM12] wird anhand der einzelnen Wöhlerlinien der verschiedenen Auslagerungszustände T4, T6 und T7 der Aluminiumlegierung EN AW-6060 bei den Prüffrequenzen 140 Hz und 700 Hz im Schwingspielzahlbereich zwischen $N = 10^6$ und $N = 10^9$ Schwingspielen durchgeführt, Abbildung 6.17 und 6.18 und im Anhang Abbildung A.2 und A.3. Als Vergleichskriterium wird die Streubreite in Richtung der Spannungsamplitude T_σ verwendet, Tabelle 6.5.

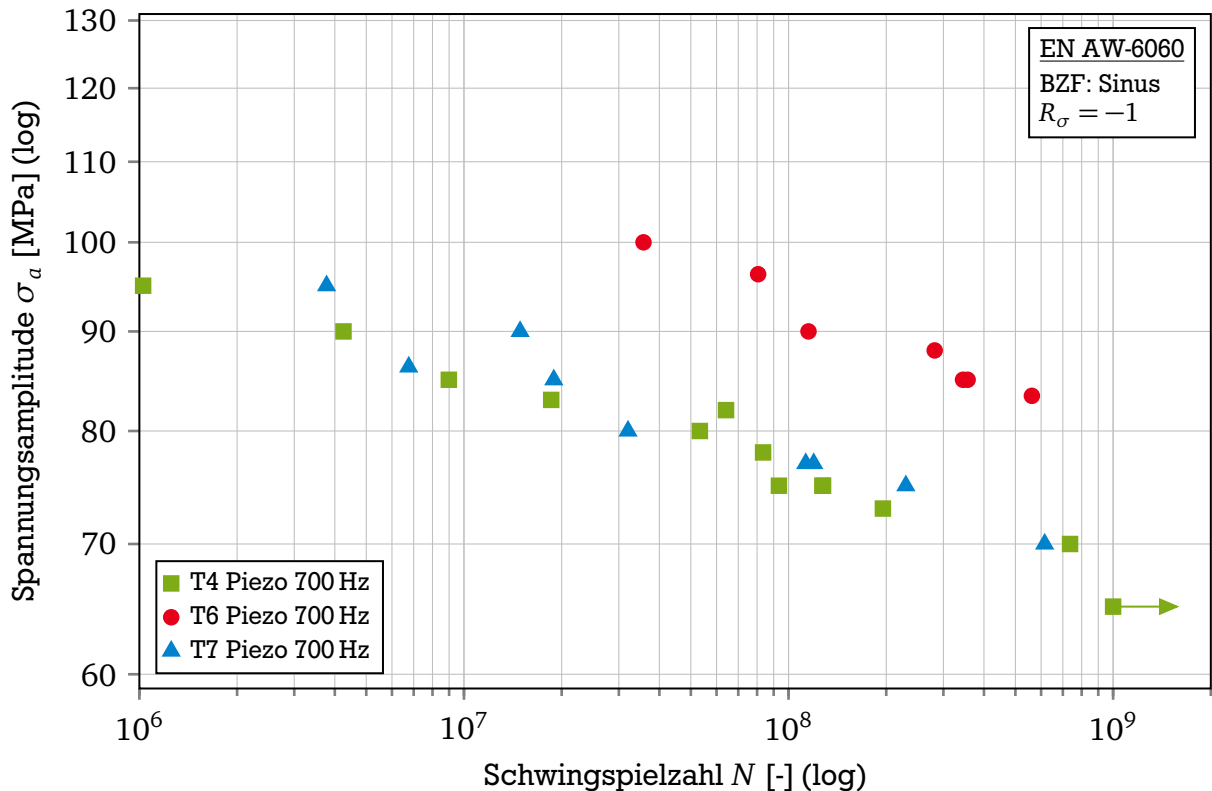


Abbildung 6.16.: Punkte der Versuchsergebnisse des Piezoprüfstandes bei 700 Hz Versuchsfrequenz im Wöhlerdiagramm dargestellt

Da für die Ergebnisse nach [FKM12] nur Datenpunkte bis $N_G = 10^8$ Schwingspiele eingegangen sind, ist die Streubreite T_σ mit durchschnittlich $T_\sigma = 1,06$ für ein Versuchsfrequenz von 140 Hz etwas geringer als die Streubreite der Auswertung nach [Sons05] mit $T_\sigma = 1,11$. Die einzelnen Werte streuen untereinander nur sehr wenig. Dies zeigt die Standardabweichung von $s_{T_\sigma} = 0,01$ bis $s_{T_\sigma} = 0,07$. Das waagerechte Abknicken der Auswertung nach [FKM12] überschätzt die Lebensdauer jedoch bei hohen Schwingspielen, Abbildung 6.18 und A.3.

Aufgrund der sehr eng beieinander liegenden Ergebnisse wird eine gemeinsame Auswertung der Neigung und der Streuung vorgenommen. Die statistische Auswertung der Wöhlerversuchsergebnisse erfolgt hierzu in einem normierten Wöhlerdiagramm. Die Auswertung der Neigung und des Streumaßes wird dabei gleichzeitig über alle Versuche berechnet. Die Datenbasis für die Regression wird hierdurch erhöht, sodass auch für Versuchsreihen mit wenigen Versuchspunkten

Tabelle 6.5.: Vergleich der Streuungen der einzelnen Wöhlerlinien der verschiedenen Auslagerungszustände T4, T6 und T7 der Aluminiumlegierung EN AW-6060 bei den Prüffrequenzen 140 Hz und 700 Hz im Schwingspielzahlbereich zwischen $N = 10^6$ und $N = 10^9$ Schwingspielen mit konstanter Neigung nach [Sons05] und [FKM12]

Auswertung T_σ	f [Hz]	T_σ T4	T_σ T6	T_σ T7	$\varnothing T_\sigma$	s_{T_σ}
nach [Sons05] ($k^* = 22$)	140	1,10	1,11	1,13	1,11	0,01
	700	1,07	1,11	1,11	1,11	0,02
nach [FKM12] ($k^* = 15, N_G = 10^8$)	140	1,06	1,04	1,08	1,06	0,02
	700	1,08	1,04	1,21	1,11	0,07

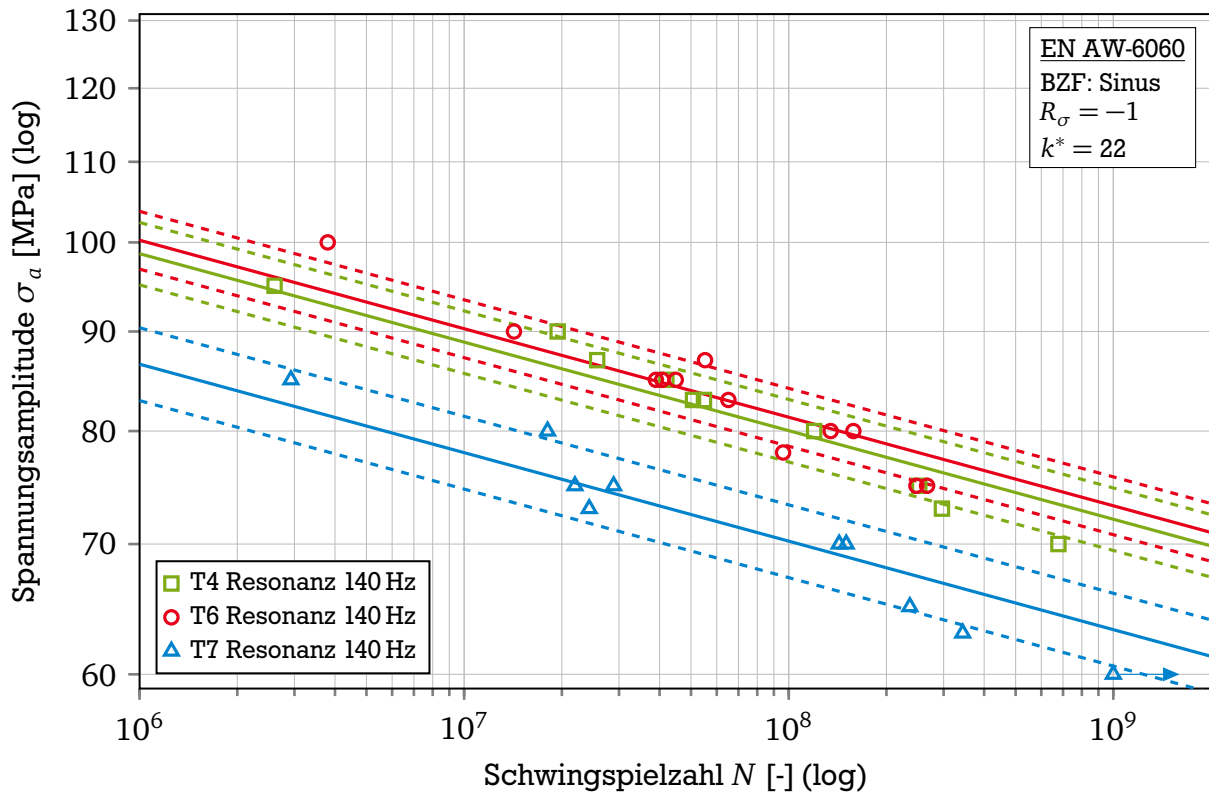


Abbildung 6.17.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Resonanzpulsers bei 140 Hz mit Auswertung nach [Sons05] mit einer konstanten Neigung von $k^* = 22$

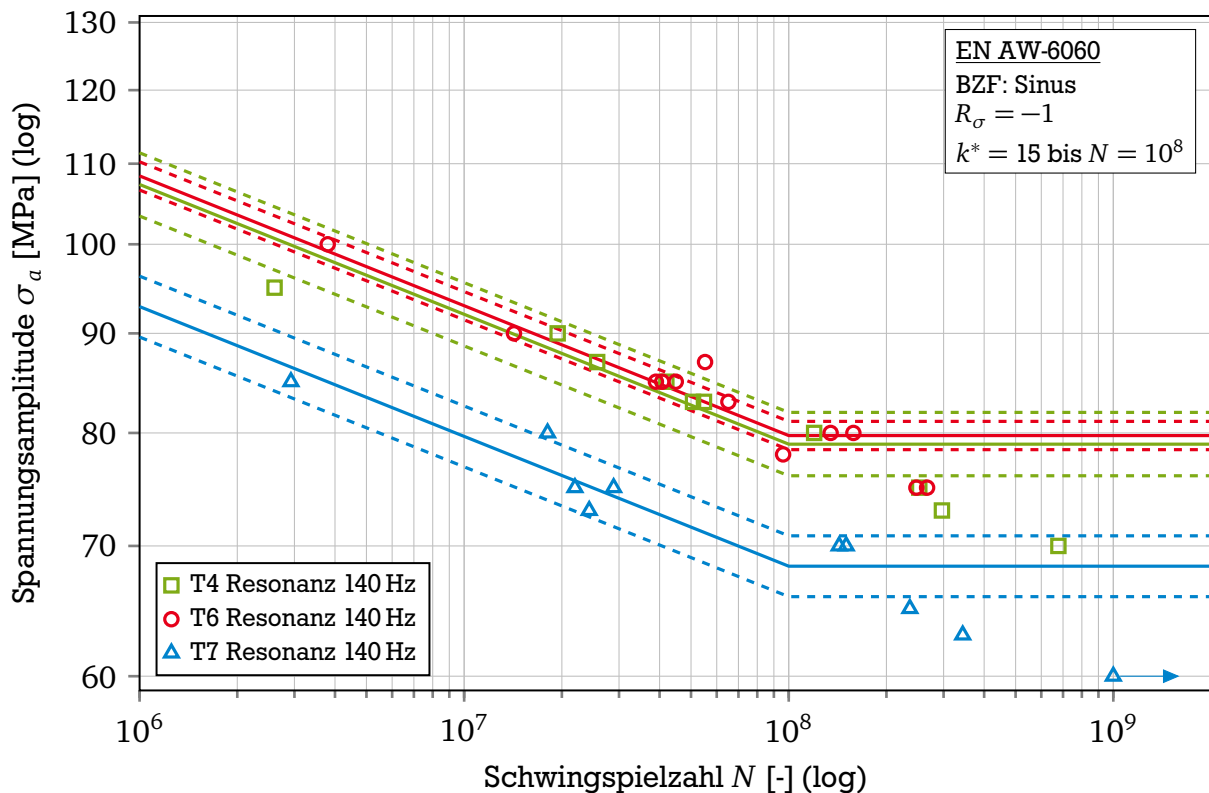


Abbildung 6.18.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Resonanzpulsers bei 140 Hz mit Auswertung nach [FKM12] mit einer konstanten Neigung von $k^* = 15$

eine zuverlässige Neigung angegeben werden kann. Dazu werden die Versuchsergebnisse der einzelnen spannungsgeregelten Versuchsreihen jeweils bei $N = 10^8$ Schwingspielen auf $\sigma_{a,n} = 1$ normiert und gemeinsam in einem Wöhlerdiagramm aufgetragen, Abbildung 6.19.

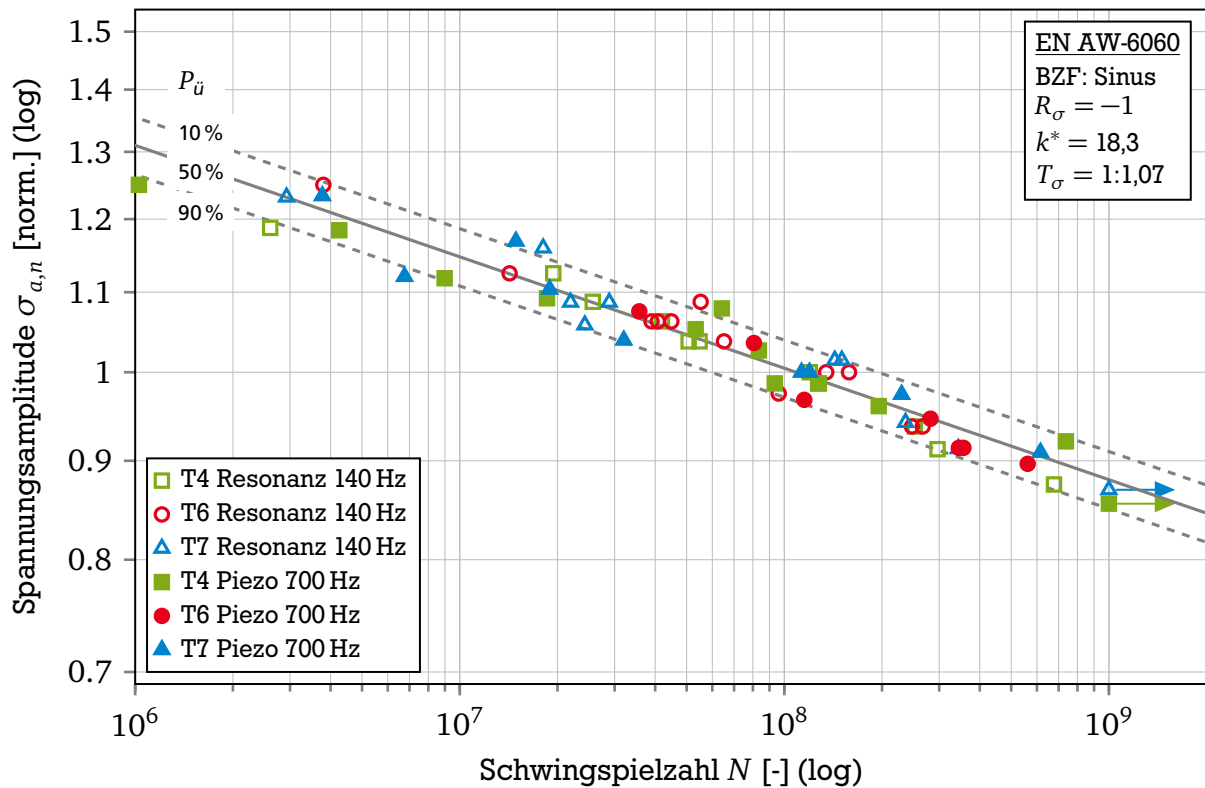


Abbildung 6.19.: Normierte Wöhlerlinie: Versuchspunkte der Auslagerungszustände T4, T6 und T7 bei 140 Hz und 700 Hz auf den Spannungswert bei $N = 1 \cdot 10^8$ Schwingspiele normiert

Für die so aufgetragenen Ergebnisse lässt sich eine gemeinsame Neigung und ein enges Streuband bestimmen. Nach der statistischen Auswertung der Neigung und der Streuung der normierten Wöhlerlinie ergibt sich eine Neigung von $k^* = 18,3$ und eine Streuung in Spannungsrichtung von $T_\sigma = 1,07$, Tabelle 6.6. Verglichen mit einer üblichen Streubreite von $T_\sigma = 1,25$ [Sons05, Aden02] ist die Streubreite in Spannungsrichtung von $T_\sigma = 1,07$, die über alle Versuche ermittelt wurde, geringer als erwartet. Die Neigung liegt mit $k^* = 18,3$ zwischen den in [Sons05] und [FKM12] vorgeschlagenen Neigungen für Aluminiumlegierungen.

Tabelle 6.6.: Ergebnisse der Regression der normierten Wöhlerlinie

k^*	T_σ
18,3	1,07

Die so ermittelte Neigung und die Streubreite wird im Folgenden auf die einzelnen Versuchsreihen angewendet, um diese miteinander zu vergleichen.

Ein paralleler Verlauf der Wöhlerlinien bei gleichem Werkstoff und unterschiedlichen Versuchsfrequenzen im Langzeitfestigkeitsbereich ist auch in anderen Veröffentlichungen zu finden. In [Harr59, Harr61, Engl07, Zhu.08, Maye01, Schn14] werden ebenfalls Wöhlerlinien bei verschiedenen Frequenzen gezeigt, die im Langzeitfestigkeitsbereich eine parallele Neigung annehmen.

6.3.1 Wöhlerergebnisse bei 140 Hz (Resonanz)

Abhängig von der Probensteifigkeit und der optimierten Massenkonfiguration des Resonanzpulsers stellt sich eine Versuchsfrequenz von 140 Hz ein. Abbildung 6.20 zeigt das Wöhler-Diagramm für die Versuchsergebnisse, die mit dem Resonanzpulsers erzielt wurden.

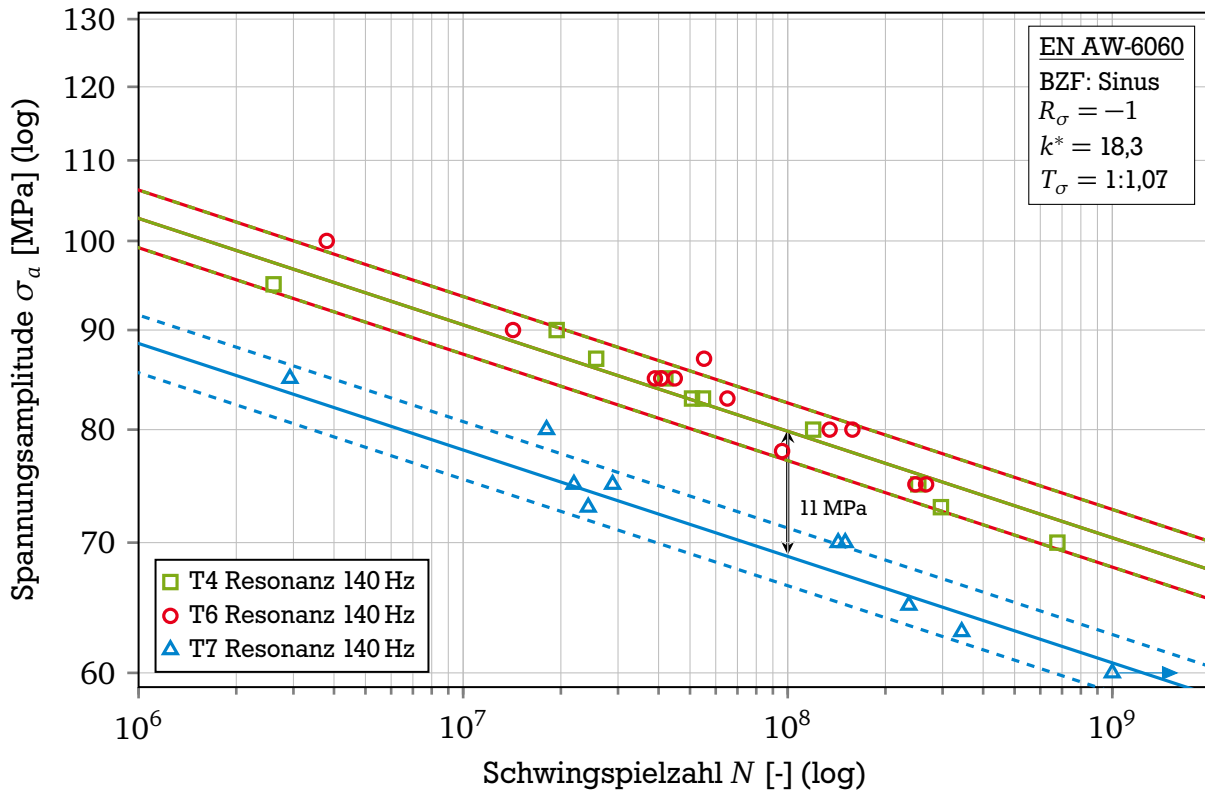


Abbildung 6.20.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Resonanzpulsers

Aufgrund der zyklischen Verfestigung im Zustand T4 beträgt die Lebensdauer für die quasi-statische Dehngrenze von $R_{p,0,2} = 74$ MPa noch etwa $N = 3 \cdot 10^8$ Schwingspiele. Somit wirkt sich das zyklisch transiente Werkstoffverhalten auch noch im Langzeitfestigkeitsbereich auf die Schwingfestigkeit aus. In Folge dessen fallen die erzielten Lebensdauern des Zustands T4 in das Streuband der Versuchsergebnisse des Zustands T6. Bei einer Schwingspielzahl von $N = 1 \cdot 10^8$ Schwingspielen ergibt sich für die Zustände T4 und T6 eine mittlere Schwingfestigkeit von $\sigma_a = 80$ MPa. Für den Zustand T7 ergibt sich bei der selben Schwingspielzahl eine um 11 MPa niedrigere Schwingfestigkeit von $\sigma_a = 69$ MPa.

6.3.2 Wöhlerergebnisse bei 700 Hz (Piezo)

Die Schwingfestigkeitsergebnisse auf dem Piezoprüfstand (s. Kapitel 5.3.2) sind in Abbildung 6.21 dargestellt. Anders als beim Resonanzpulsers kann die Versuchsfrequenz beim Piezoprüfstand genau vorgegeben werden. In diesem Fall wird die Versuchsfrequenz für alle Zustände auf 700 Hz eingestellt.

Bei Prüfungen mit hohen Frequenzen muss sichergestellt werden, dass der Versuch nicht durch eine hohe Eigenerwärmung der Probe beeinflusst wird. Dies wird durch eine Temperaturüber-

wachung mittels eines Infrarotpyrometers (Abbildung 5.4) gewährleistet. Während der Versuche hat sich herausgestellt, dass die Aluminiumlegierung EN AW-6060 keine Eigenerwärmung bei Prüffrequenzen von 700 Hz zeigt. Diese Eigenschaft von Aluminium wird durch [Bath10] bestätigt.

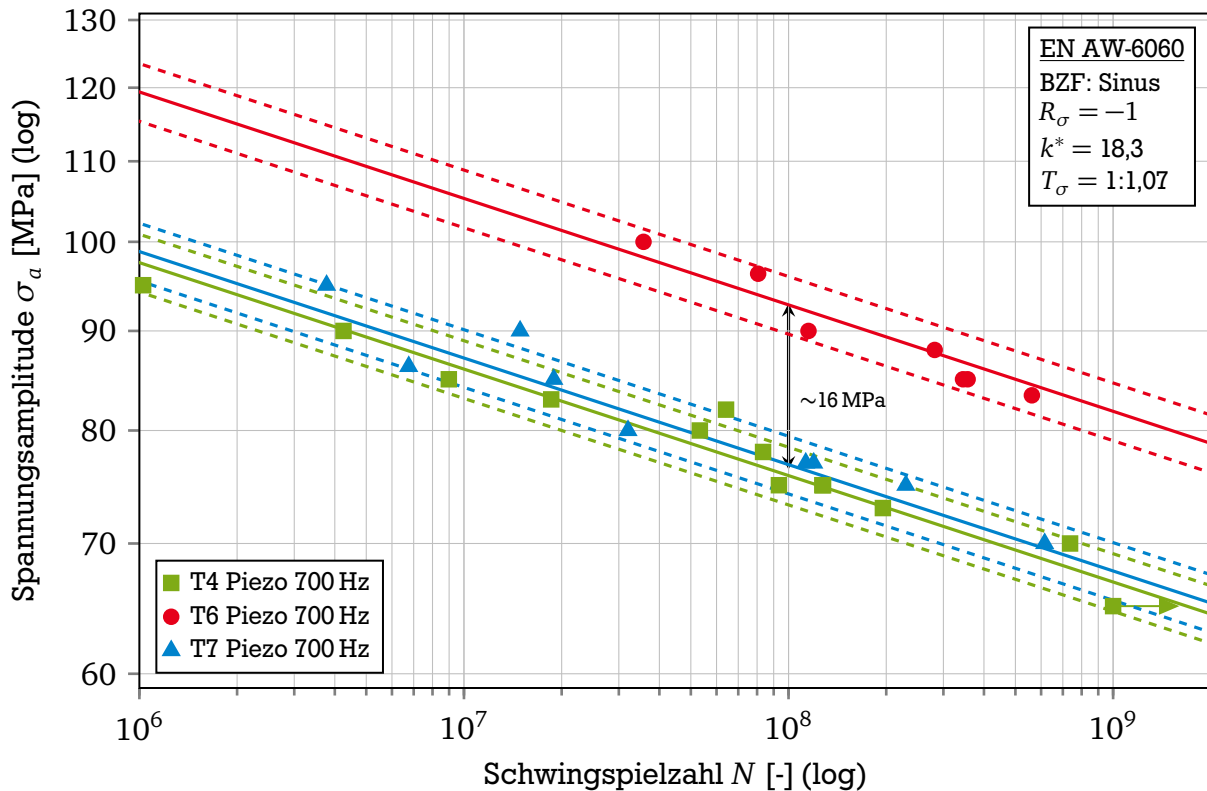


Abbildung 6.21.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Piezoprüfstands

Werden die Versuchsergebnisse bei einer Schwingspielzahl von $N = 1 \cdot 10^8$ betrachtet, liegt die mittlere Schwingfestigkeit des Zustands T4 bei $\sigma_a = 76$ MPa und des Zustands T7 bei $\sigma_a = 77$ MPa. Die Versuchsergebnisse des Zustands T4 liegen somit im Streuband des Zustands T7. Die mittlere Schwingfestigkeit des Zustands T6 liegt mit $\sigma_a = 93$ MPa bei $N = 1 \cdot 10^8$ rund 16 MPa höher als die mittlere Schwingfestigkeit der beiden anderen Zustände.

6.3.3 Wöhlerergebnisse bei 20 kHz (Ultraschall)

Zur Untersuchung der Schwingfestigkeit im Langzeitfestigkeitsbereich werden vielfach Ultraschallschwingfestigkeitsprüfungen eingesetzt. Diese wurden für die Zustände T4 und T6 durchgeführt. Bei Ultraschallschwingfestigkeitsprüfungen erfolgt die Vorgabe der Lastamplituden nur über Wegvorgaben, die mittels DMS-Kalibrierung abgeglichen werden. Diese dehnungs- bzw. weggesteuerten Versuche müssen mittels des für den Werkstoff EN AW-6060 ermittelten Elastizitätsmodul von 64 GPa in Spannungswerte umgerechnet werden, um diese mit den spannungsgeregelt aufgenommenen Ergebnissen vergleichbar zu machen. Die so errechneten Ergebnisse der Versuche sind im Wöhlerdiagramm, Abbildung 6.22, dargestellt.

Werden die für die spannungsgeregelten Versuche errechneten Streubänder und Neigungen auf die Ultraschallschwingfestigkeitsdaten angewendet, zeigt sich für den Zustand T6 eine sehr gute Übereinstimmung der Versuchspunkte mit der Neigung $k = 18,3$ und dem Streuband der

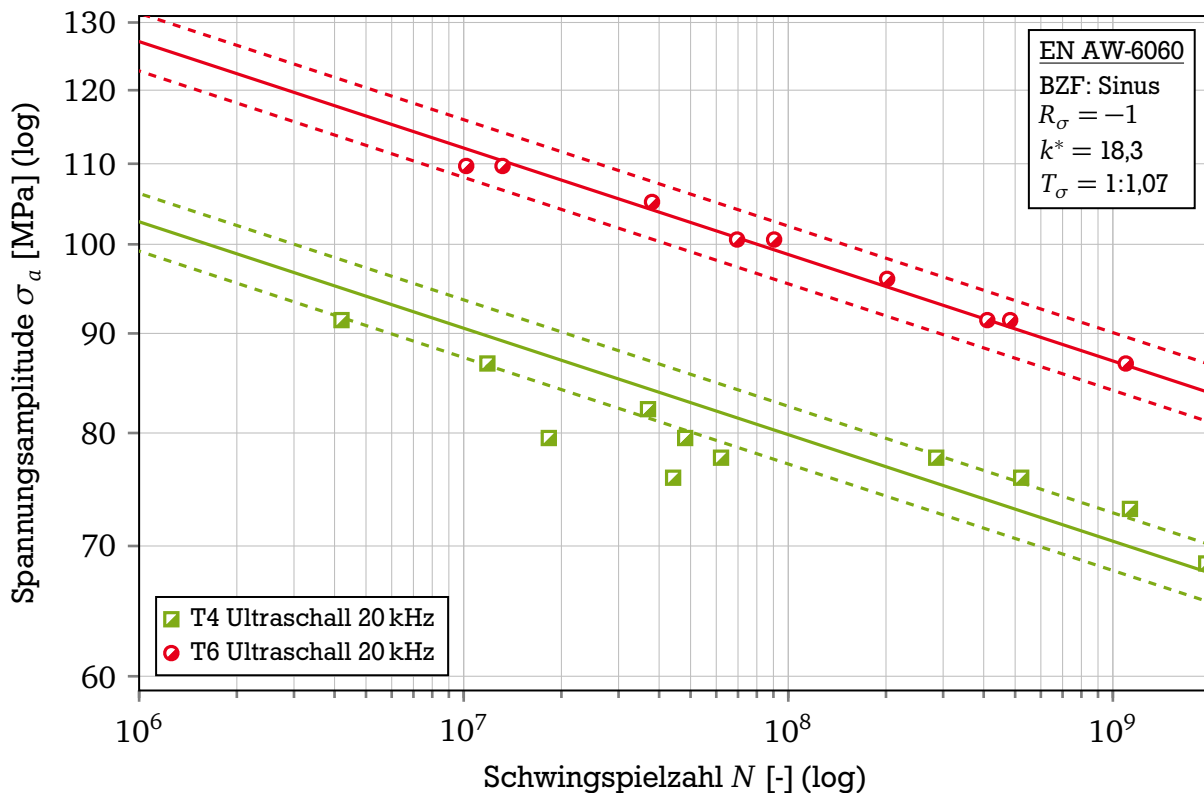


Abbildung 6.22.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstands

übrigen Schwingfestigkeitsergebnisse. Die mittlere Schwingfestigkeit der Ultraschallschwingfestigkeitsergebnisse für den Zustand T6 liegt bei $N = 1 \cdot 10^8$ Schwingspielen bei $\sigma_a = 99$ MPa. Die Schwingfestigkeitsergebnisse für den Zustand T4 streuen hingegen stärker als die spannungsgeregelten Versuche vermuten lassen. Eine Ursache für die größere Streuung kann das transiente Werkstoffverhalten des Zustands T4 sein. Im zyklischen Spannungs-Dehnungsdiagramm (Abbildung 6.13) lässt sich zeigen, dass der Werkstoff im Zustand T4 schon unter 50 MPa zyklisch verfestigt. Die für die Ermüdung im Langzeitfestigkeitsbereich notwendige mittlere Spannungsamplitude im Schwingungszahlbereich von $N = 1 \cdot 10^8$ liegt jedoch bei 80 MPa. Dies lässt auf plastische Anteile der Spannungsamplitude schließen. Für den Zustand T4 liegt die Belastung damit über der statischen Dehngrenze von $R_{p0,2} = 72$ MPa. Plastische Dehnungsanteile sollten jedoch bei der Ultraschallschwingfestigkeitsprüfung ausgeschlossen werden. Das geänderte Spannungs-Dehnungsverhalten führt beim Versuch in dem Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstand zu einem geänderten Schwingverhalten der Probe, das während des Versuchs nicht korrigiert werden kann und die Probe somit einer leichten aber durch fehlende Messmöglichkeiten nicht weiter quantifizierbaren Abweichung ermüdet wird.

6.3.4 Auswertung des Frequenzeinflusses

Zur Abschätzung des Frequenzeinflusses werden die Versuchspunkte je nach Auslagerungszustand bei verschiedenen Frequenzen betrachtet. Ab einer Schwingenspielzahl von $N = 1 \cdot 10^6$ Schwingspielen zeigt sich ein paralleler Verlauf, das heißt gleiche Neigungen, der Wöhlerlinien, Abbildungen 6.23 bis 6.25.

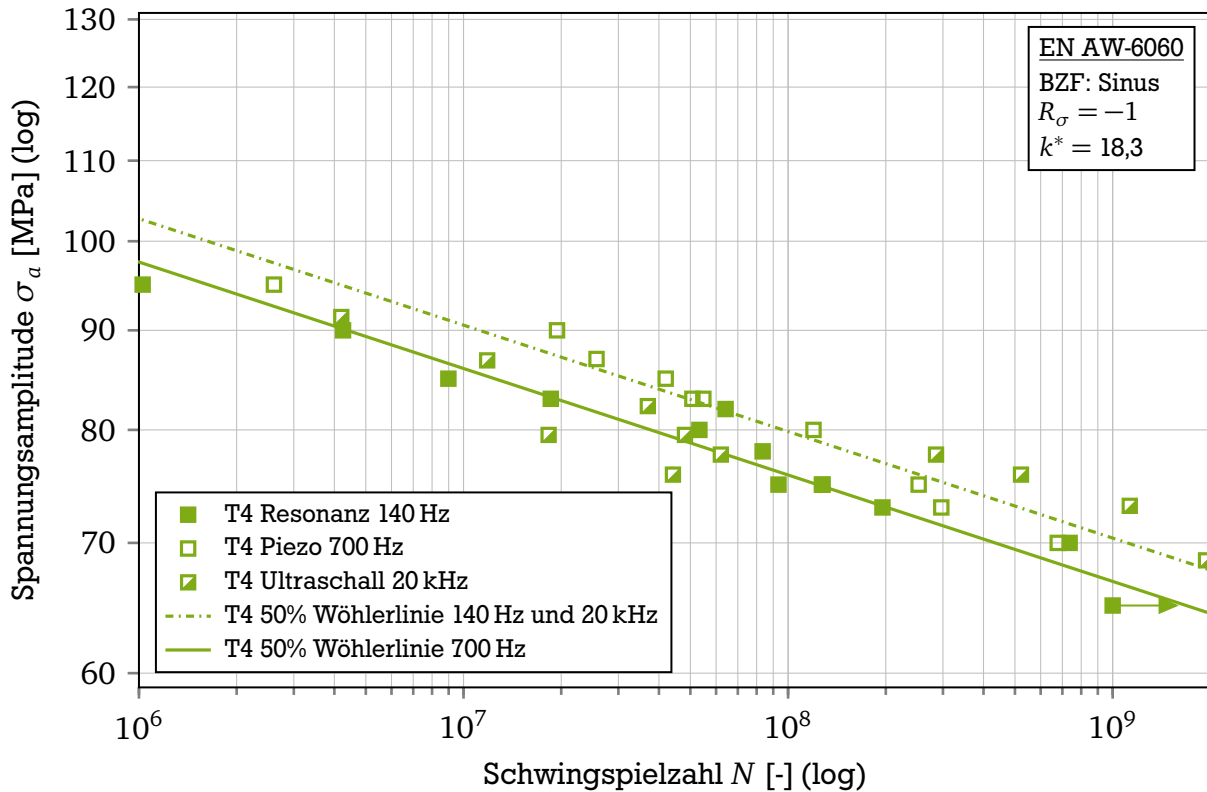


Abbildung 6.23.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Auslagerungszustands T4

Für die Analyse des Frequenzeinflusses ist daher die Betrachtung der Spannungsamplituden bei einer Lebensdauer ausreichend. Dementsprechend wird für die folgenden Betrachtungen eine Schwingenspielzahl von $N = 1 \cdot 10^8$ Schwingspielen gewählt, Abbildung 6.26.

Beim Auslagerungszustand T4 beträgt die Spannungsamplitude bei $N = 1 \cdot 10^8$ Schwingspielen ca. $\sigma_a = 80$ MPa und ist unabhängig von der Beanspruchungsfrequenz.

Auffallend ist ein deutlicher Einfluss der Versuchsfrequenz bei den Auslagerungszuständen T6 und T7.

Der Anstieg der ertragbaren Spannungsamplituden steigt dabei für den Zustand T6 zwischen 140 Hz und 700 Hz von $\sigma_a = 80$ MPa um 16 % auf $\sigma_a = 93$ MPa. Über den sehr viel größeren Frequenzabstand zwischen 700 Hz und 20 kHz steigt die Spannungsamplitude mit weiteren 7 % auf $\sigma_a = 99$ MPa sehr viel weniger stark an.

Im Bereich zwischen 140 Hz und 700 Hz steigt die ertragbare Spannungsamplitude für den Zustand T7 mit 12 % von $\sigma_a = 69$ MPa auf $\sigma_a = 77$ MPa ebenfalls deutlich an.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Frequenzeinfluss vom Auslagerungszustand der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 abhängig ist. Sind wie im Zustand T4 keine Ausscheidungen im Werkstoff vorhanden, ist kein Frequenzeinfluss zu erkennen. Die Zustände T6 und T7 mit ausgeprägten

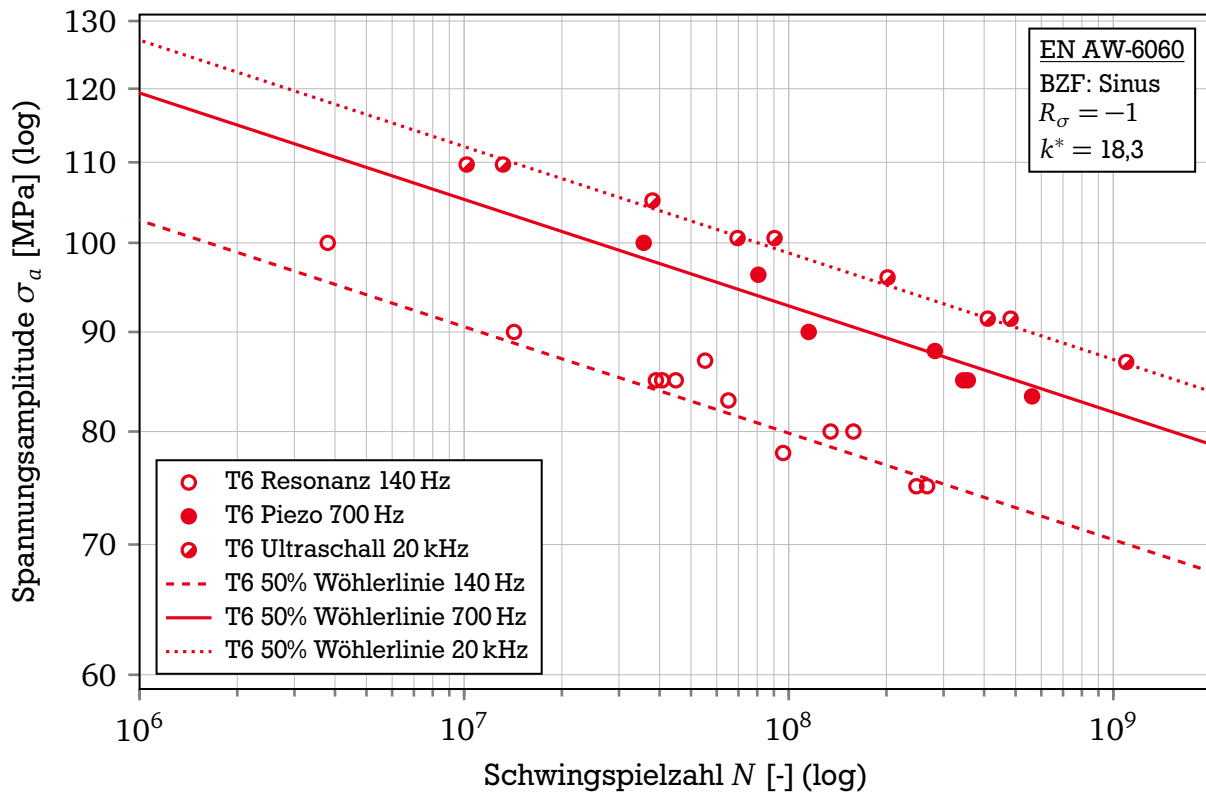


Abbildung 6.24.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Auslagerungszustands T6

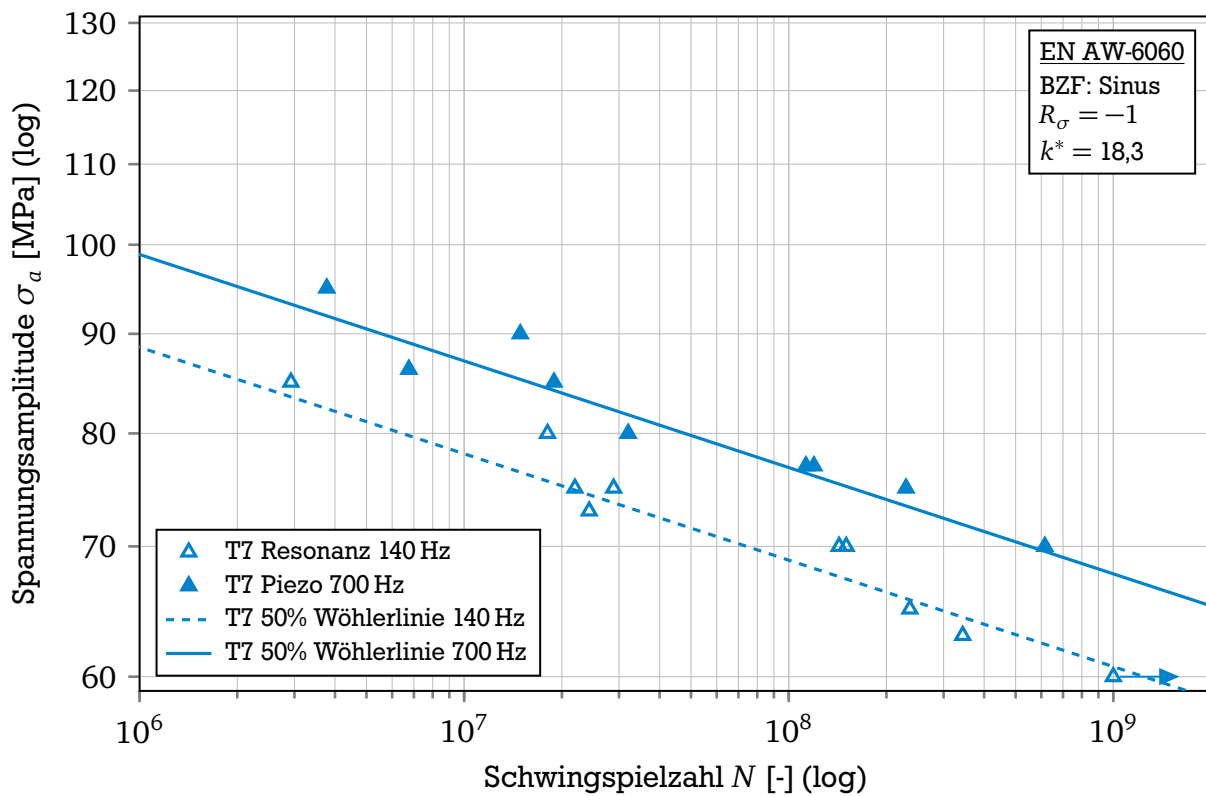


Abbildung 6.25.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Auslagerungszustands T7

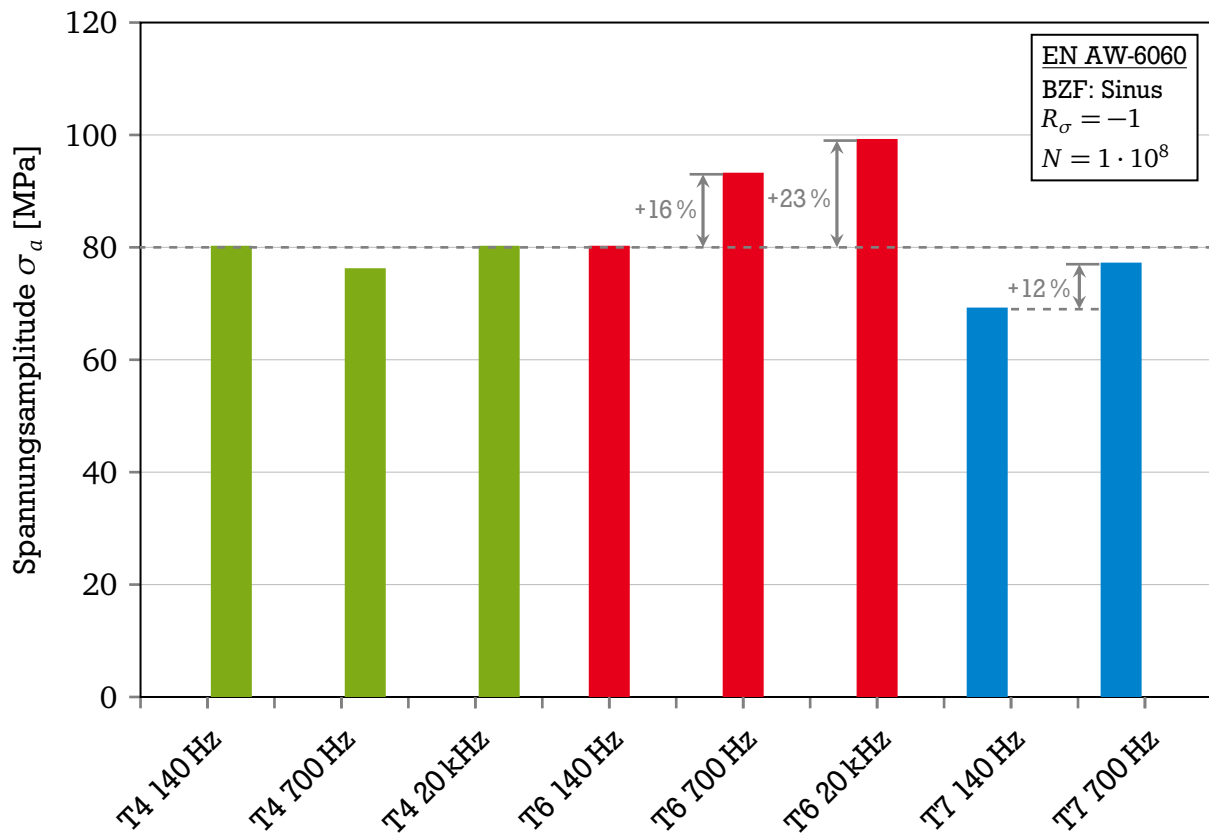


Abbildung 6.26.: Vergleich der Spannungsamplituden bei 10^8 Schwingspielen

Ausscheidungen im Material zeigen hingegen bei zyklischer Beanspruchung einen deutlichen Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Lebensdauer des Werkstoffes.

Abbildung 6.27 zeigt den beobachteten Frequenzeinfluss der Aluminiumlegierung EN AW-6060 im Zustand T6 im Vergleich zu den Ergebnissen von [Harr59, Harr61], Tabelle A.25, in der Darstellung von [Sons03, Rada07]. Der starke Anstieg der ertragbaren Spannungsamplitude mit der Versuchsfrequenz im unteren Frequenzbereich deckt sich mit den Versuchsergebnissen von [Harr59, Harr61]. In der Darstellung von [Sons03, Rada07] lässt sich jedoch kein Abflachen bei höheren Frequenzen erkennen, sondern eine stetig zunehmende Schwingfestigkeit mit der Versuchsfrequenz. Dass jedoch eine Grenze des Anstiegs der ertragbaren Spannungsamplitude vorhanden sein muss, zeigen die Beobachtungen von [Lair82], die das Prüfen mit Frequenzen im Ultraschallbereich mit dem Prüfen im Vakuum vergleichbar ansehen, sofern der Frequenzeinfluss auf die korrosive Wirkung der Umgebungsluft zurückzuführen ist. Somit ist ein langsamerer Anstieg der ertragbaren Amplituden bei höheren Frequenzen und eine Annäherung an diese Grenze zu erwarten, wie sie in den Versuchsergebnissen der Aluminiumlegierung EN AW-6060 im Zustand T6 gezeigt werden.

6.3.5 Mathematische Beschreibung des Frequenzeinflusses

Aus den gewonnenen Erkenntnissen des im Langzeitfestigkeitsbereich abflachenden Verlauf des Frequenzeinflusses in den neuen Versuchsergebnissen und dem im Stand der Technik beschriebenen Einfluss der Umgebungsluft auf den Frequenzeinfluss stellt sich die Frage, ob der Frequenzeinfluss mit einer Sättigungsfunktion beschrieben werden kann.

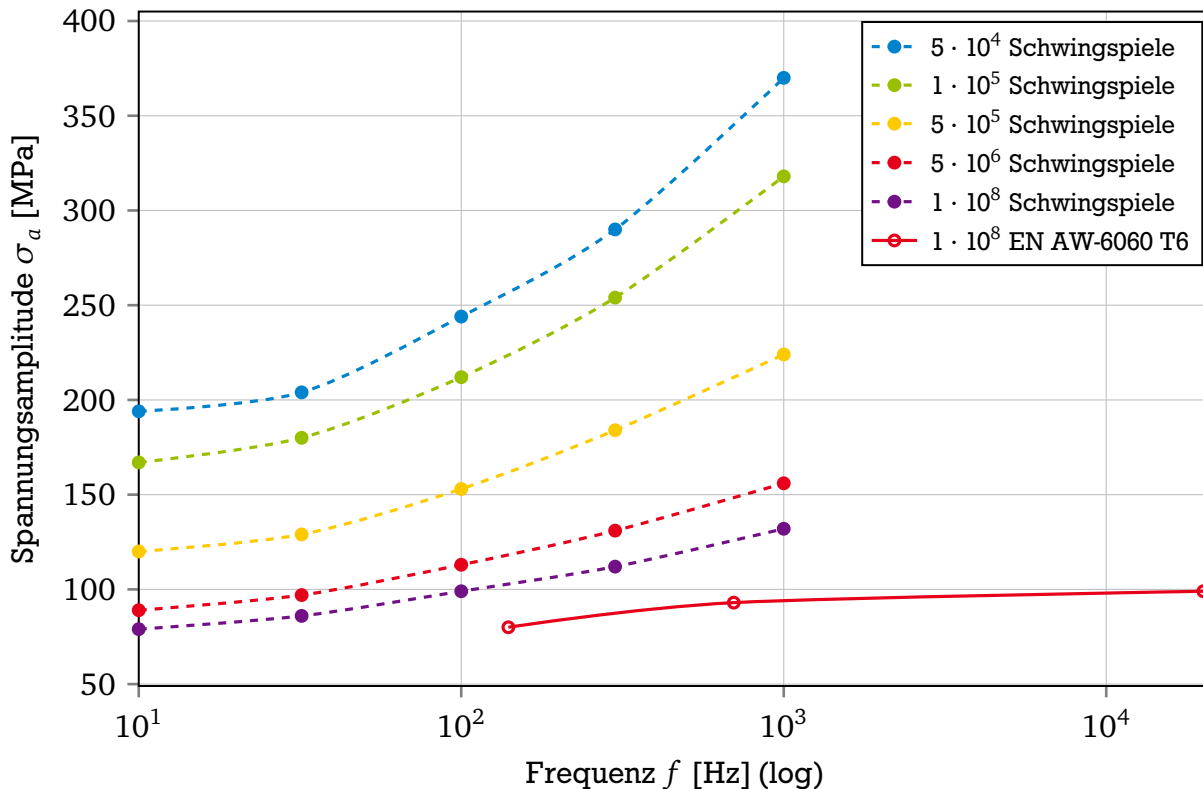


Abbildung 6.27.: Darstellung des Frequenzeinflusses im Vergleich mit Daten von HARRIS [Harr59, Harr61] mit logarithmierter Frequenzachse, entsprechend der Ergebnisinterpretation nach [Sons03, Rada07]

Diese Vermutung wird bestärkt, wenn die Daten von [Harr59, Harr61] nicht wie in [Sons03, Rada07], Abbildung 2.29 und 6.27, über der logarithmierten Frequenz aufgetragen werden, sondern die Achse der Frequenz linear dargestellt wird. Dabei ergibt sich für die Daten von [Harr59, Harr61] ein Verlauf der ertragbaren Spannungsamplitude über der Frequenz, welcher der Form einer Sättigungsfunktion ähnlich sieht, Abbildung 6.28, und dabei einen ähnlichen Verlauf zeigt wie die Ergebnisse der Aluminiumlegierung EN AW-6060 im Zustand T6, Abbildung 6.28.

Aus den Versuchsergebnissen von [Harr59, Harr61] ergeben sich folgende Randbedingungen für die gesuchte Funktion zur Beschreibung des Frequenzeinflusses auf die Schwingfestigkeit:

- Es muss für die gleichen Schwingungsspielzahlen eine Sättigungsfunktion mit unterer und oberer Grenze definiert werden. Das heißt:
 - Eine untere, ertragbare Spannungsamplitude (Spannungsamplitude bei Frequenz $f \rightarrow 0$)
 - Eine obere, ertragbare Spannungsamplitude (Spannungsamplitude bei Frequenz $f \rightarrow \infty$)
- Für alle Schwingungsspielzahlen muss die Funktion alle ertragbaren Spannungsamplituden bei den verschiedenen Frequenzen zwischen den Grenzen $f \rightarrow 0$ und $f \rightarrow \infty$ annähern können.

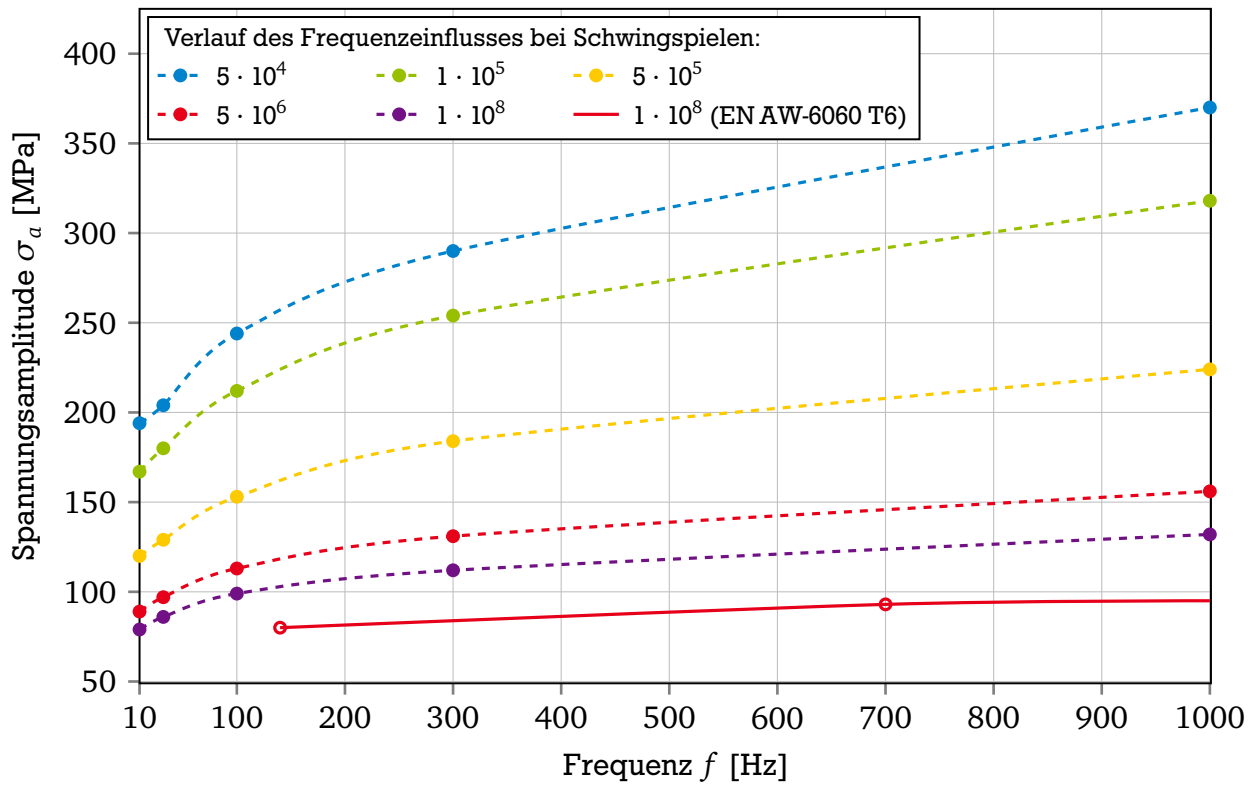


Abbildung 6.28.: Darstellung des Frequenzeinflusses im Vergleich mit Daten von HARRIS [Harr59, Harr61]

- Aufgrund der Annahme einer natürlichen Ursache des Frequenzeinflusses (z.B. unter anderem Korrosion durch die Umgebungsluft) lässt eine Exponentialfunktion für begrenztes Wachstum als geeignete Funktion als sinnvoll erscheinen, vgl. [Enge10].

Entsprechende Sättigungsfunktionen sind aus der Biologie, der Chemie und der Ökonomie bekannt. In [Jano57] wird eine vierparametrische Sättigungsfunktion beschrieben, die mit den oben beschriebenen Anforderungen vergleichbar ist. Angepasst auf den Verlauf des Frequenzeinflusses ergibt sich Gleichung 6.1.

$$\sigma_{a,f,N} = \sigma_{a,f \rightarrow \infty, N} - \left(\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N} - \sigma_{a,f \rightarrow 0, N} \right) \cdot e^{(-k_{gr} \cdot f^{\delta_w})} \quad (6.1)$$

Da kein Wendepunkt in der Funktion vermutet wird (exponentielles Wachstum), ergibt sich für den Wendepunktparameter $\delta_w = 1$, sodass dieser keinen Einfluss auf das Berechnungsergebnis hat und die Gleichung vereinfacht werden kann, Gleichung 6.2.

$$\sigma_{a,f,N} = \sigma_{a,f \rightarrow \infty, N} - \left(\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N} - \sigma_{a,f \rightarrow 0, N} \right) \cdot e^{(-k_{gr} \cdot f)} \quad (6.2)$$

Die Funktion der ertragbaren Spannungsamplitude bei einer bestimmten Schwingspielzahl $\sigma_{a,f,N}$ ist dabei abhängig von der Frequenz f . Die Variable $\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ gibt die Spannungsamplitude bei nahezu unendlicher Frequenz bzw. im Vakuum (vgl. [Lair82]) an. $\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ ist die Spannungsamplitude die bei Frequenzen in der Nähe von 0 Hz erreicht werden. Die beiden Grenzen müssen separat für jede betrachtete Schwingspielzahl definiert werden, da die resultierende Schwingspielzahl von der jeweiligen Spannungsamplitude abhängig ist, wie es von der Wöhlerlinie bekannt ist.

Anhand der Daten von [Harr59, Harr61] werden mittels Iteration in einem Programm zur Darstellung mathematischer Funktionen die Parameter der Ausgleichsfunktion für die verschiedenen Schwingungszahlen abgeschätzt. Da noch keine Werte für die Funktion vorhanden sind, werden Anfangswerte abgeschätzt, um die Iteration zu beschleunigen. Als Anfangswerte werden für $\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ der jeweilige Messwert bei einer Frequenz von $f = 1000$ Hz gewählt, für $\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ jeweils der Messwert bei $f = 10$ Hz. Die Wachstumsrate wird mit $k_{gr} = 0,001$ als Schätzwert angegeben, Tabelle A.26. Nach dem Iterieren der drei Parameter $\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$, $\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ und k_{gr} fällt auf, dass die Werte für die Wachstumsrate zwischen $k_{gr} = 0,0025$ und $0,0036$ mit einem maximalen Fehler von $\Delta k_{gr} = 0,0009$ streuen. Für die Werte der Wachstumsrate wird deshalb der gewichtete Mittelwert $\bar{k}_{gr} = 0,003$ und der dazugehörige Fehler $\Delta \bar{k}_{gr} = 0,0003$ bestimmt, Gleichung 6.3 und Tabelle 6.7, da aufgrund der Streuung um den gewichteten Mittelwert davon ausgegangen wird, dass die Wachstumsrate des Frequenzeinflusses für den selben Werkstoff konstant ist.

$$\bar{k}_{gr} = \frac{\sum_i \frac{k_{gr}}{\Delta k_{gr}}}{\sum_i \frac{1}{\Delta k_{gr}}} \quad \text{mit} \quad \Delta \bar{k}_{gr} = \sqrt{\frac{1}{\sum_i \frac{1}{\Delta k_{gr}}}} \quad (6.3)$$

Tabelle 6.7.: Wachstumsraten k_{gr} für die durch die Sättigungsfunktion ermittelten Werte bei verschiedenen Schwingungszahlen aus Daten von [Harr59, Harr61] und deren gewichteter Mittelwert

N	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^8$	\bar{k}_{gr} mit $\Delta \bar{k}_{gr}$
k_{gr}	0,0025	0,0028	0,0032	0,0035	0,0036	0,0030
Δk_{gr}	0,0005	0,0005	0,0005	0,0008	0,0009	$\pm 0,0003$

Mit der konstanten Wachstumsrate wird die Iteration nun mit den zwei variablen Parametern $\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ (obere Grenze des Frequenzeinflusses) und $\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ (untere Grenze des Frequenzeinflusses) erneut durchgeführt, Tabelle 6.8. Für die abgeschätzten Parameter der oberen und unteren Grenze des Frequenzeinflusses fällt auf, dass die Fehler für diese Parameter zwischen $N = 5 \cdot 10^5$ und $N = 1 \cdot 10^8$ Schwingungen mit einem maximalen Fehler von ± 3 MPa in einem sehr engen Streuband liegen, obwohl die Streuungen der Messwerte aus [Harr59, Harr61] nicht mit berücksichtigt werden konnten.

Mit den in Tabelle 6.8 ermittelten Werten werden die Ausgleichsfunktionen aufgestellt und in Abbildung 6.29 zusammen mit den Datenpunkten dargestellt.

Wird das vorgestellte Vorgehen zur Ableitung der Parameter des Frequenzeinflusses auf die Versuchsergebnisse der Aluminiumlegierung EN AW-6060 im Zustand T6 angewendet, können die in Tabelle 6.9 abgeschätzten Parameter für die Funktion des Frequenzeinflusses ermittelt werden. Als Startwerte der Iteration werden die Werte der Spannungsamplituden bei $f = 140$ Hz (untere Grenze) und $f = 20$ kHz (obere Grenze) verwendet. Aufgrund der Datenbasis von drei Versuchsfrequenzen, kann kein Fehler für die Ausgleichsfunktion angegeben werden. Die für den Zustand T6 ermittelte Wachstumsrate der Ausgleichsfunktion liegt bei $k_{gr} = 0,002$. Die untere Grenze der Funktion des Frequenzeinflusses wird mit $\sigma_{a,f \rightarrow 0, N} = 74$ MPa und die obere Grenze mit $\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N} = 99$ MPa ermittelt.

Tabelle 6.8.: Ermittlung der Parameter für die Funktion der ertragbaren Spannungsamplitude $\sigma_{a,f,N}$ in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Schwingspielzahl N für die Daten von [Harr59, Harr61] mit Hilfe eines Programms zur Darstellung mathematischer Funktionen mit konstantem $k_{gr} = 0,003$

$N = 5 \cdot 10^4$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	370	$375 \pm 6,6$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	194	$188 \pm 4,8$
$N = 1 \cdot 10^5$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	318	$324 \pm 4,5$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	167	$165 \pm 3,3$
$N = 5 \cdot 10^5$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	224	$230 \pm 3,0$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	120	$119 \pm 2,2$
$N = 5 \cdot 10^6$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	156	$160 \pm 3,0$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	89	$90 \pm 2,2$
$N = 1 \cdot 10^8$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	132	$135 \pm 2,9$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	79	$81 \pm 2,1$

Dabei wird deutlich, dass die ertragbare Spannungsamplitude von sehr niedrigen Versuchsfrequenzen bis zu 1000 Hz deutlich ansteigt, Abbildung 6.30. Nach 1000 Hz nähert sich die Kurve einem Plateau an.

Tabelle 6.9.: Parameter für die Funktion der ertragbaren Spannungsamplitude $\sigma_{a,f,N}$ in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Schwingspielzahl N für die Daten der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 T6

$N = 1 \cdot 10^8$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	99	99
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	80	74
k_{gr}	0,001	0,002

Wird die Darstellung der Abzisse aus Abbildung 6.30 logarithmisch dargestellt, wird deutlich, dass in dieser Darstellung der Frequenzeinfluss im niedrigen Frequenzbereich nur langsam und bis 1000 Hz überproportional anzusteigen scheint. Erst nach 1000 Hz nähert sich die Kurve der oberen Grenze an, Abbildung 6.31. Dies erklärt die exponentiell ansteigende Darstellung von [Sons03, Rada07], welche durch die Datenbasis von [Harr59, Harr61] nur auf Daten bis 1000 Hz aufbaut. Zur Darstellung des Frequenzeinflusses wird aus diesem Grund die lineare Darstellung empfohlen, da die logarithmische Darstellung den Verlauf des Frequenzeinflusses zu stark verzerrt und somit die Interpretation erschwert wird.

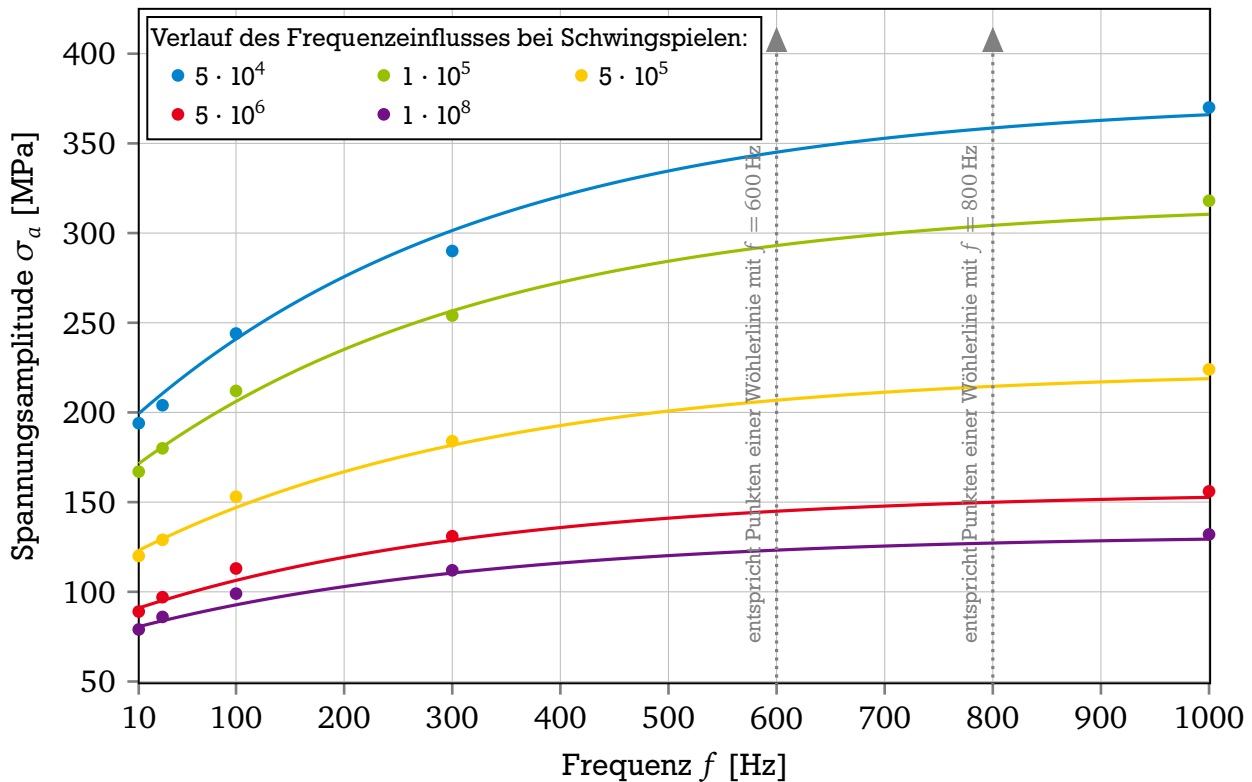


Abbildung 6.29.: Datenpunkte aus Daten von [Harr59, Harr61] durch Funktion 6.2 angenähert

Die Darstellung der hier gezeigten Sättigungsfunktion führt somit die exponentielle Darstellung des Frequenzeinflusses und die Annäherung an einen Grenzwert, wie sie im Stand der Technik dargestellt werden, zusammen und löst damit diesen Widerspruch auf.

Aus der Formel 6.2 lässt sich der Umrechnungsfaktor des Frequenzeinflusses $\Delta f_{\text{influence}}$ für die Spannungskennwerte ableiten. Dieser ergibt sich für jede beliebige Frequenz indem der Wert der Spannungsamplitude bei der Frequenz, von der umgerechnet werden soll ($\sigma_{a,f,\text{start}}$) und der Wert der Spannungsamplitude bei der Frequenz, zu der umgerechnet werden soll ($\sigma_{a,f,\text{end}}$) jeweils über Formel 6.2 ermittelt wird. Anschließend wird das Verhältnis aus $\sigma_{a,f,\text{start}}$ und $\sigma_{a,f,\text{end}}$ gebildet, Gleichung 6.4.

$$\Delta f_{\text{influence}} = \frac{\sigma_{a,f,\text{start}}}{\sigma_{a,f,\text{end}}} \quad (6.4)$$

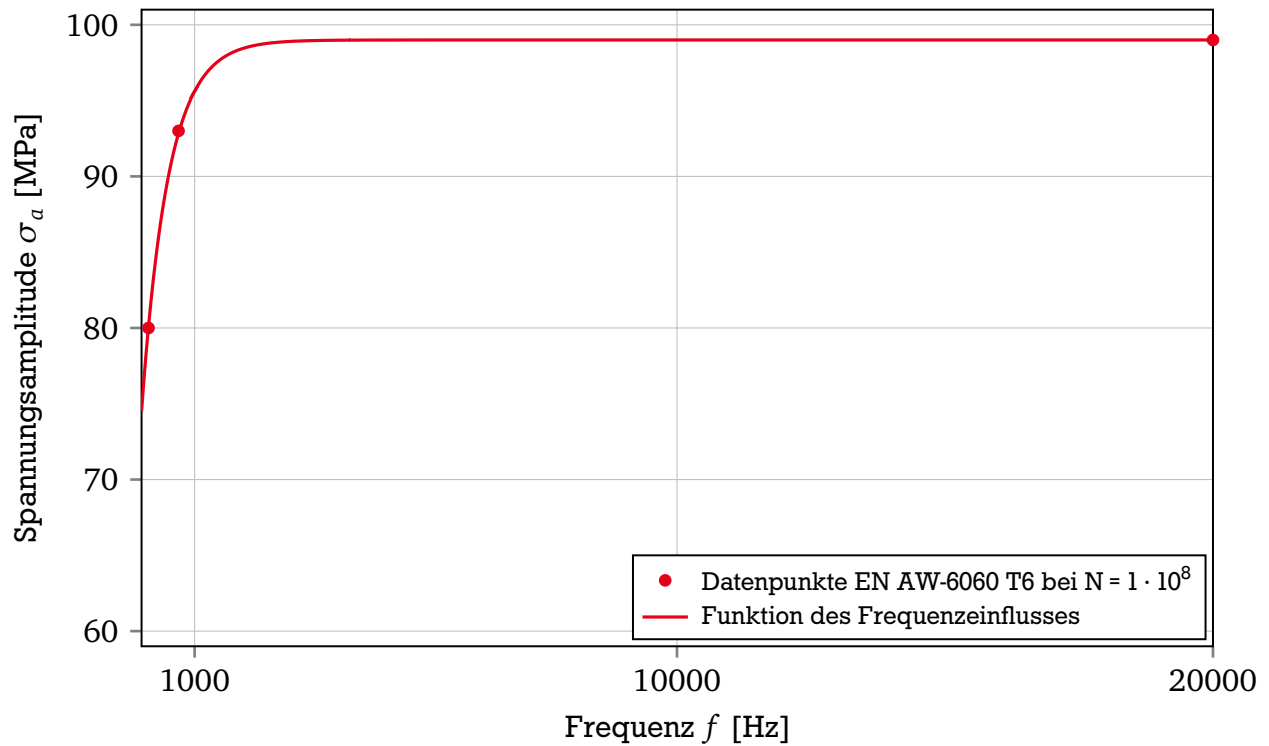


Abbildung 6.30.: Spannungsamplituden der Aluminiumlegierung EN AW-6060 T6 bei $N = 10^8$ über der linear skalierten Frequenz aufgetragen und mit Funktion 6.2 angenähert

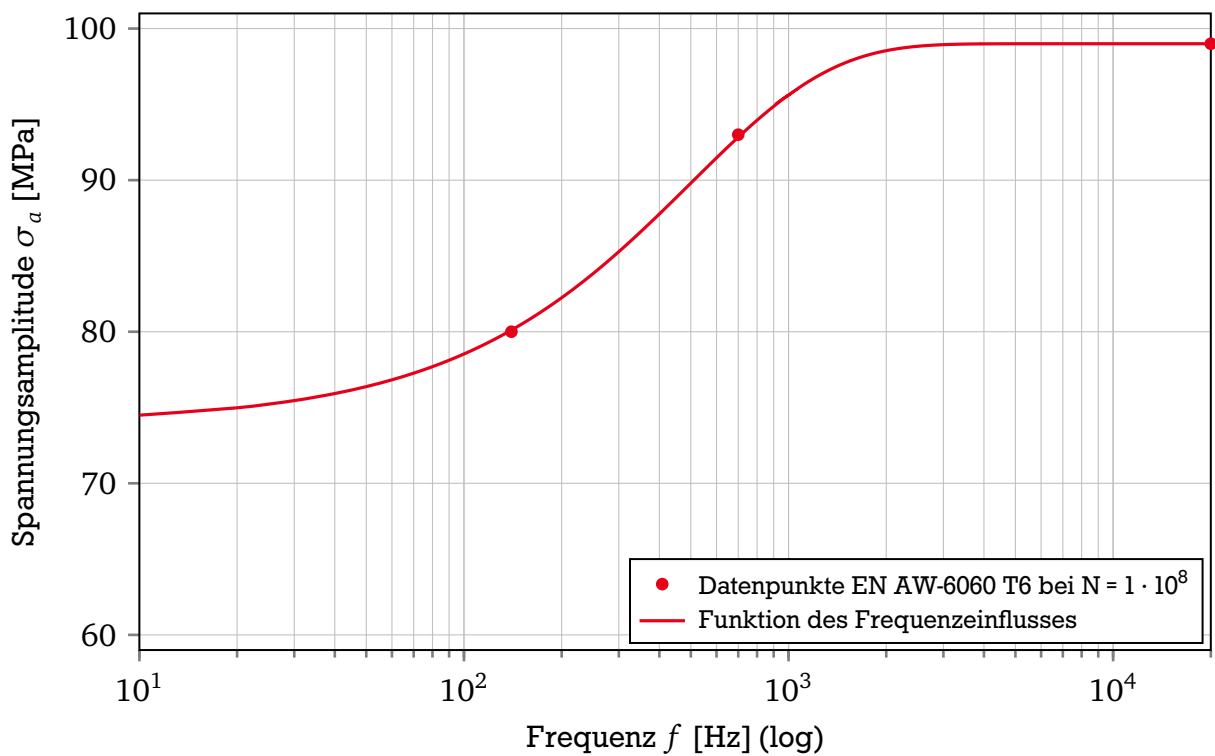


Abbildung 6.31.: Spannungsamplituden der Aluminiumlegierung EN AW-6060 T6 bei $N = 10^8$ über der logarithmisch skalierten Frequenz aufgetragen und mit Funktion 6.2 angenähert

6.4 Fazit Schwingfestigkeit und Frequenzeinfluss

Werden die hier ermittelten spannungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuche mit üblichen Wöhler Versuchsergebnissen verglichen, ist die mit $T_\sigma = 1,07$ geringe Streubreite der normierten Wöhlerlinie über alle Versuche gegenüber einer erfahrungsmässigen Streubreite von $T_\sigma = 1,25$ bei Wöhlerversuchen auffallend. Der Vergleich mit den in der Literatur vorgegebenen Neigungen Langzeitfestigkeitsbereich von $k^* = 22$ [Sons05] und $k^* = 15$ [FKM12] führt zu vergleichbaren Streuungen und lässt eine gemeinsame Auswertung aller Versuche im normierten Wöhlerdiagramm zu. Daraus ergeben sich einheitliche Neigungen für die Wöhlerlinien über alle Zustände und Frequenzen im Langzeitfestigkeitsbereich. Die so ermittelte Neigung von $k^* = 18,3$ hat dabei einen leicht steileren Abfall als die in [Sons05] empfohlene Neigung von $k^* = 22$, die jedoch mit einer durchschnittlichen Streuung von $T_\sigma = 1,11$ die Versuchspunkte ebenfalls überdurchschnittlich gut abbildet. Wird die Neigung von $k^* = 15$ aus [FKM12] mit der ermittelten Neigung verglichen, zeigt sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Die Bewertung nach [FKM12] liegt jedoch für Schwingspielzahlen über $N_G = 10^8$ wegen des waagerechten Abknickens der Wöhlerlinie auf der unsicheren Seite.

Die bei der Untersuchung des zyklischen Werkstoffverhaltens erkannte Abhängigkeit des transienten Werkstoffverhaltens vom Auslagerungszustand spiegelt sich ebenfalls in den Ergebnissen der spannungsgeregelten Versuche wider. So zeigen die dehnungsgeregelten Versuche ein starkes Verfestigungsverhalten für den Auslagerungszustand T4, der bei den spannungsgeregelten Versuchen ebenfalls eine sehr hohe Schwingfestigkeit erreicht, die im Bereich des Auslagerungszustands T6 liegt.

Demgegenüber zeigt der Zustand T4 keine Empfindlichkeit auf die Versuchsfrequenz, während die Zustände T6 und T7 eine deutliche Steigerung der Schwingfestigkeit mit der Versuchsfrequenz erfahren. Dies bedeutet, dass bei der Bewertung der Lebensdauer von Bauteilen aus der Aluminiumlegierung EN AW-6060 mit den Zuständen T6 und T7 auch die Frequenz unter der die Kennwerte aufgenommen und die Bauteile beansprucht werden mit beachtet werden muss. Eine zu hohe Prüffrequenz bei der Erstellung der Werkstoffkennwerte könnte bei niedrigfrequent beanspruchten Bauteilen zu einem Überschätzen der Lebensdauer und somit zu einem zu frühen Ausfall führen. Die Funktion des Frequenzeinfluss ist am Beispiel der Aluminiumlegierung EN AW-6060 gezeigt worden. Eine Übertragbarkeit auf weitere Aluminiumlegierungen muss in weiteren Untersuchungen validiert werden.

Sind Schwingfestigkeitsergebnisse von mehreren Prüffrequenzen vorhanden, lassen sich Ergebnisse bei weiteren Prüffrequenzen über eine Sättigungsfunktion abbilden, mit der die ertragbare Spannungsamplitude bei einer bestimmten Frequenz und Schwingspielzahl abgeschätzt werden kann.

Die durchgeführten Ultraschallschwingfestigkeitsversuche bestätigen den Verlauf der Sättigungsfunktion und die Annahme, dass der Frequenzeinfluss bei Aluminiumlegierungen zu höheren Frequenzen hin abnimmt. Für Werkstoffzustände, die im Ultraschallschwingfestigkeitsversuch ausschließlich mit makroskopisch elastischen Dehnungsamplituden belastet werden, kann bis auf den Frequenzeinfluss eine sehr gute Korrelation der Neigung und Streuung der Wöhlerlinie zu den spannungsgeregelten Versuchen hergestellt werden. Geringe plastische Anteile und transiente Effekte im Werkstoffverhalten wie z.B. beim Auslagerungszustand T4 führen jedoch zu Abweichungen der Versuchsergebnisse zwischen spannungsgeregelten Wöhlerversuchen und Ultraschallschwingfestigkeitsversuchen.

Die spannungsgeregelten Werkstoffkennwerte für den Langzeitfestigkeitsbereich können so sehr zeitsparend mit Hilfe einer hochfrequenten Prüftechnik, wie z.B. des Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstands oder der Piezoprüfmaschine, ermittelt werden. Dabei ist wegen eines eventuellen Frequenzeinflusses nicht die Lage der Wöhlerlinie interessant, sondern lediglich ihre Neigung im Langzeitfestigkeitsbereich. Mit der niederfrequenten Prüftechnik kann die Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich aufgenommen werden und die Wöhlerlinie dann ab dem Abknickpunkt mit der in den hochfrequenten Prüfungen ermittelten Neigung k^* weitergeführt werden. Die Lage der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich kann mit wenigen niederfrequenten Versuchen mit Schwingspielzahlen im Übergang zwischen Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich bestätigt werden, Abbildung 6.32.

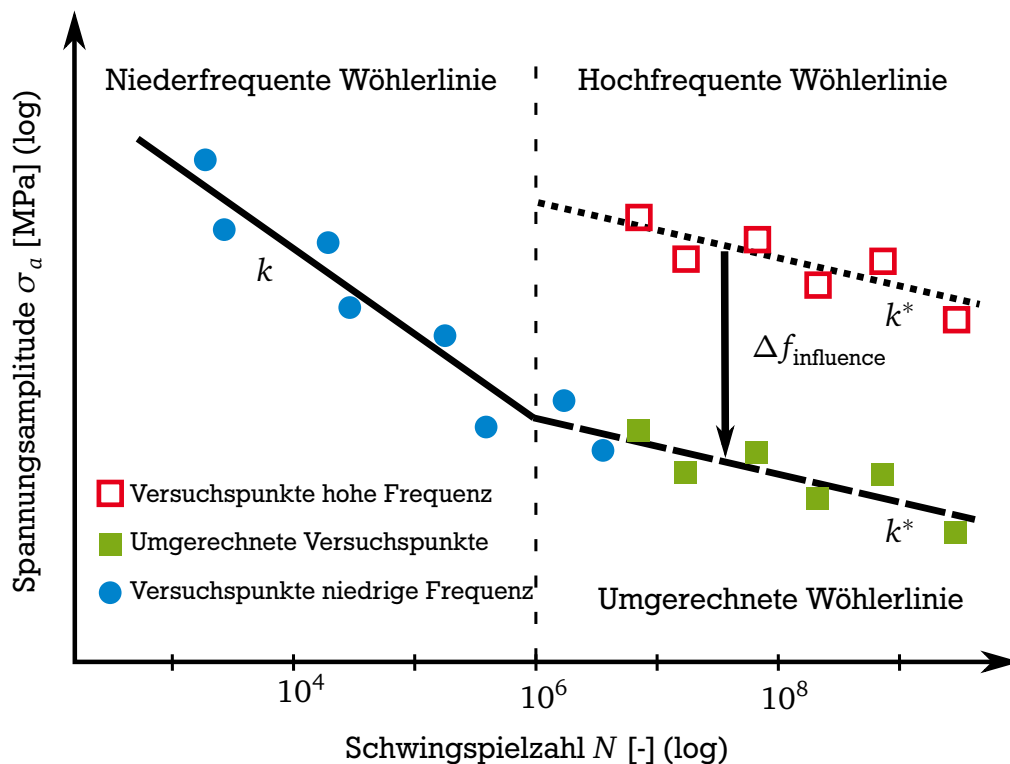


Abbildung 6.32.: Vorgehen zur Ableitung einer Spannungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich mit Hilfe des Frequenzeinflusses (schematisch)

Der Kurzzeitfestigkeitsbereich kann mit dieser Methode so nicht abgeschätzt werden. Für eine durchgehende Darstellung des zyklischen Werkstoffverhaltens muss deshalb auf die dehnungsgeregelten Versuche und die Dehnungswöhlerlinie zurückgegriffen werden.



7 Erweiterung der Dehnungswöhlerlinie in den Langzeitfestigkeitsbereich

Die Auswertung im Kurzzeitfestigkeitsbereich ist mit spannungsgeregelten Versuchen nicht möglich. Für eine durchgehende Wöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich wird deshalb auf die konzepte der Dehnungswöhlerlinie zurückgegriffen.

Der Verlauf der Dehnungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich ist mit den im Stand der Technik vorgestellten Methoden bisher jedoch nicht abschätzbar.

Bei der Auswertung nach [Klee73] ist die Kenntnis der plastischen Dehnungsanteile mit einer hohen Genauigkeit essentiell. Mit kleiner werdenden Gesamtdehnungsamplituden, das heißt mit zunehmender Schwingspielzahl, nehmen die plastischen Dehnungsanteile jedoch immer mehr ab, sodass die Belastbarkeit der plastischen Dehnungsanteile stark abnimmt. Die Auswirkungen auf die Gesamtdehnungswöhlerlinie, die durch die plastischen Dehnungsanteile bewirkt werden, ist ebenfalls geringer, je kleiner die Gesamtdehnungsamplitude ist. Im Langzeitfestigkeitsbereich sind deshalb nur noch makroskopisch elastische Dehnungsamplituden vorhanden. Demnach ist für die Bewertung des zyklischen Werkstoffverhaltens bei hohen Schwingspielzahlen ein Ansatz zu verfolgen, der die Auswirkungen der elastischen Dehnungsamplituden berücksichtigt.

Dies ist der Fall bei der Auswertung bei dem tri-linearen Dehnungswöhlerlinienansatz. Der tri-lineare Ansatz zur Beschreibung der Dehnungswöhlerlinie gibt für den dritten Bereich, der den Bereich hoher Schwingspielzahlen abbildet, vor, dass nur makroskopisch elastisches Dehnungsverhalten vorhanden sein darf. In [Wage07] werden dazu lediglich verschiedene Möglichkeiten für den weiteren Verlauf der Dehnungswöhlerlinie vorgeschlagen, da zu diesem Zeitpunkt der Verlauf der Dehnungswöhlerlinie im dritten Bereich aufgrund von fehlenden Messergebnissen nicht validierbar gewesen ist.

Mit den vorgestellten zyklischen Versuchsergebnissen zur Aluminiumlegierung EN AW-6060 im Langzeitfestigkeitsbereich ist nun eine Erweiterung der Dehnungswöhlerlinie für den dritten Bereich der tri-linearen Auswertung möglich.

Anders als in [Wage07] und Gleichung 2.25 dargestellt, muss für den dritten Bereich nur der elastische Anteil der Dehnungswöhlerlinie betrachtet werden, Gleichung 7.1 .

$$\varepsilon_{a,e} = \frac{\sigma'_{f_3}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_3} \quad (7.1)$$

7.1 Neigung der Dehnungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich

Da die Spannungswöhlerlinien unter der Annahme eines makroskopisch elastischen Werkstoffverhaltens aufgestellt wurden, kann die Neigung k^* der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich als Neigung einer elastischen Gerade angesehen werden. Für die Neigung der elastischen Dehnungswöhlerlinie wird der zyklische Schwingfestigkeitsexponent b verwendet, Gleichung

2.20. Über Gleichung 7.2 stehen der zyklische Schwingfestigkeitskoeffizient b und die Neigung der Wöhlerlinie k in einer Beziehung, sodass mit dem negativen reziproken Wert der Neigung k der zyklische Schwingfestigkeitskoeffizient b ausgedrückt werden kann [Haib02].

$$b = -\frac{1}{k} \quad (7.2)$$

Für den dritten Bereich der Dehnungswöhlerlinie kann der Wert für b_3 nun über Gleichung 7.3 aus k^* errechnet werden.

$$b_3 = -\frac{1}{k^*} \quad (7.3)$$

Die Neigung der Dehnungswöhlerlinie lässt sich somit direkt aus der Spannungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich ableiten. Für die untersuchte Aluminiumlegierung EN AW-6060 ergibt sich danach ein Wert von $b_3 = -0,0546$, Gleichung 7.4.

$$b_3 = -\frac{1}{k^*} = -0,0546 \quad \text{mit } k^* = 18,3 \quad (7.4)$$

Werden die Neigungen der elastischen Dehnungswöhlerlinie b_i für die drei Bereiche der tri-linearen Wöhlerlinie einzeln betrachtet, Tabelle 7.1, kann für die Zustände T6 und T7 eine deutliche Korrelation der Neigungen des ersten und des dritten Bereichs erkannt werden. Für den Zustand T6 ist die Neigung der elastischen Dehnungswöhlerlinie nahezu identisch mit der ermittelten Neigung für den Bereich 3. Auch der Zustand T7 hat eine ähnliche Neigung der elastischen Dehnungswöhlerlinie im Bereich 1 und 3.

Im Verhältnis zum Bereich 2 deutet sich auch für den Zustand T4 ein starkes Abflachen der Neigungen der elastischen Dehnungswöhlerlinie im Bereich 3 an, das jedoch nicht ganz so flach ist wie der Verlauf im Bereich 1.

Tabelle 7.1.: Neigungen der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie

	T4	T6	T7
b_1	-0,0319	-0,0539	-0,0515
b_2	-0,1283	-0,1154	-0,0662
b_3	-0,0546	-0,0546	-0,0546

Für die beiden Zustände T6 und T7, bei denen die Aufhärtung durch Ausscheidungshärtung erfolgt ist, lässt sich zeigen, dass die Neigung der Spannungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich aus der Neigung der elastischen Dehnungswöhlerlinie über Gleichung 7.5 ableitbar ist. So ergibt sich für die Neigung der Spannungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich abgeleitet durch die zyklischen Kennwerte für den Zustand T6 eine Neigung von $k^* = 18,6$ und für den Zustand T7 eine Neigung von $k^* = 19,4$. Verglichen mit dem aus den spannungsgeregelten Wöhlerversuchen im Langzeitfestigkeitsbereich ermittelten Wert $k^* = 18,3$ wird der Verlauf der Wöhlerlinie sehr gut abgeschätzt.

$$k^* = -\frac{1}{b_1} \quad (7.5)$$

Da bei den Spannungswöhlerlinien im Langzeitfestigkeitsbereich für alle drei Auslagerungszustände, T4, T6 und T7, der Aluminiumlegierung ENAW-6060 die gleiche Neigung ermittelt wurde, wird aufgrund des makroskopisch elastischen Werkstoffverhaltens auch für die Dehnungswöhlerlinien von einer einheitlichen Neigung im dritten Bereich der tri-linearen Wöhlerlinie ausgegangen.

7.2 Abknickpunkt der Dehnungswöhlerlinie zum Langzeitfestigkeitsbereich

Das Konzept der tri-linearen der Dehnungswöhlerlinie gibt den Beginn des dritten Bereichs der Dehnungswöhlerlinie als die Grenze des transienten Werkstoffverhaltens an. Mit dem Beginn des dritten Bereichs gibt es keine Veränderung des Spannungs-Dehnungsverhaltens über den gesamten Zeitraum der Lebensdauer, vgl. Abbildung 2.23. Damit wird der Übergang zum dritten Bereich der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie so definiert, dass von Beginn der Beanspruchung rein makroskopisch elastisches Dehnungsverhalten vorhanden ist.

Die Auswertung der Hysteresen der ersten Zyklen der Belastung führt dabei zu keinem befriedigenden Ergebnis. Die kleinen, plastischen Dehnungsanteile lassen sich messtechnisch nur sehr schwer auflösen und damit nicht aus den Hysteresen extrahieren. Zusätzlich müssten Versuche in infinitesimal kleinen Dehnungsabstufungen durchgeführt werden, um den genauen Übergang zwischen rein linear-elastischem und elastisch-plastischem Werkstoffverhalten zu ermitteln. Dabei wird zusätzlich die Genauigkeit des Ergebnisses von der Regelgenauigkeit der dehnungsregelten Versuche beeinflusst, Abbildung 2.10.

Aus diesen Gründen wird zur Bestimmung der Grenze des linear-elastischen zum elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens, das sich durch den Beginn von transienten Effekten wie Ver- oder Entfestigungsvorgängen bemerkbar macht, ein neues Verfahren entwickelt, das auf dem Vergleich der Erstbelastungskurve mit der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve beruht. Der Beginn des Auftretens der transienten Effekte kann als der Punkt angesehen werden, an dem sich die Erstbelastungskurve und die zyklische Spannungs-Dehnungskurve anfangen zu trennen. Hierfür wird der Abstand der beiden Kurven in Dehnungsrichtung $\Delta\varepsilon_{1st,cyc}$ als Bewertungskriterium verwendet. Die Spannungsamplitude, bei der die Grenze des transienten Werkstoffverhaltens erreicht wird, soll gefunden und als σ_{limit} definiert werden.

Die Dehnung der Erstbelastungskurve $\varepsilon_{a,1st}$ und die dazugehörige Spannung $\sigma_{a,1st}$ werden zu Beginn eines jeden dehnungsregelten Versuches als Wertepaare aufgenommen. Die Dehnung $\varepsilon_{a,1st}$ und die Spannung $\sigma_{a,1st}$ sind über eine nicht weiter definierte Funktion $f(\sigma_{a,1st})$ miteinander verknüpft, Gleichung 7.6.

$$\varepsilon_{a,1st} = f(\sigma_{a,1st}) \quad (7.6)$$

Die Dehnungsabweichung zwischen der Erstbelastungskurve und der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve $\Delta\varepsilon_{1st,cyc}$ wird als Differenz zwischen der Dehnung der Erstbelastungskurve $\Delta\varepsilon_{1st,cyc}$ und der Gesamtdehnung $\varepsilon_{a,t}$ der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve berechnet, Gleichung 7.7, Abbildung 7.1.

$$\Delta\varepsilon_{1st,cyc} = \varepsilon_{a,1st} - \varepsilon_{a,t} \quad (7.7)$$

Für die Berechnung von $\Delta\varepsilon_{1st,cyc}$ werden die Spannungswerte der Erstbelastungskurve $\sigma_{a,1st}$ in die Berechnung der Dehnungswerte $\varepsilon_{a,t}$ nach RAMBERG-OSGOOD eingesetzt, Gleichung 7.8.

Dabei wird als E-Modul das individuell für die Probe ermittelte E-Modul E_{Probe} verwendet, da für eine genaue Auswertung die Steigung der Hooke'schen Gerade und der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve so genau wie möglich übereinstimmen müssen.

$$\Delta \varepsilon_{1st,cyc} = \varepsilon_{a,1st} - \left(\frac{\sigma_{a,1st}}{E_{\text{Probe}}} + \left(\frac{\sigma_{a,1st}}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right) \quad (7.8)$$

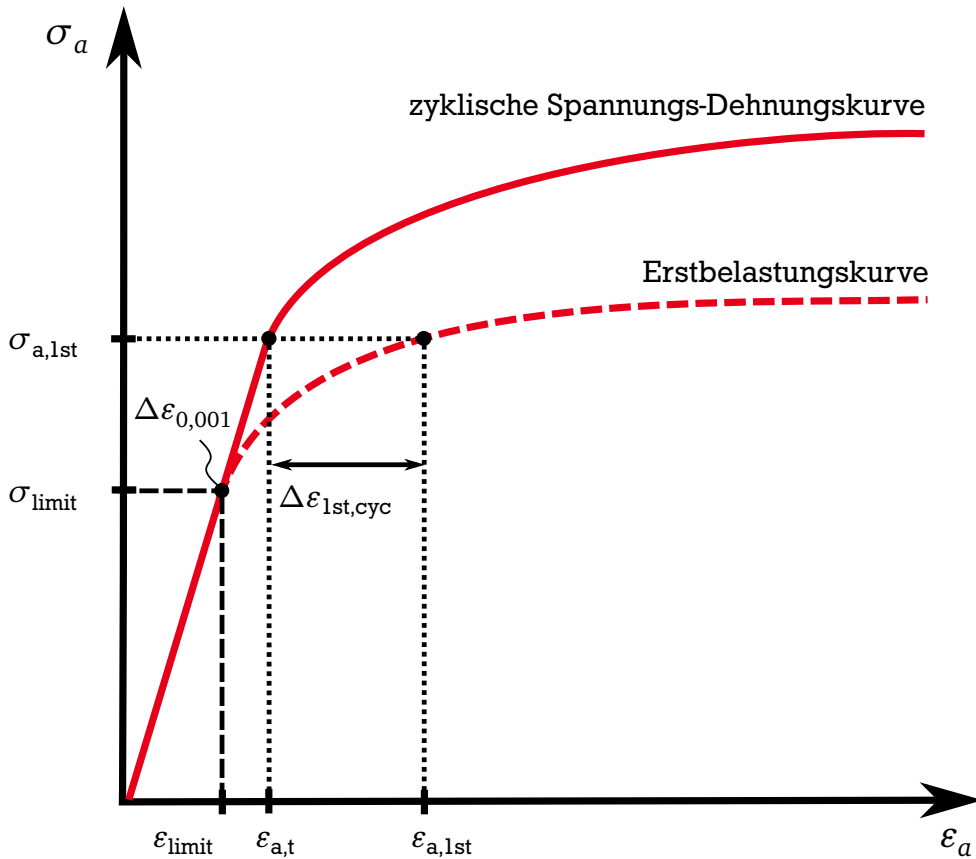


Abbildung 7.1.: Schematische Darstellung der Transienzgrenze $\Delta \varepsilon_{0,001}$

Für Spannungsamplituden $\sigma_{a,1st}$, die noch kein transientes Werkstoffverhalten initiieren, muss der Betrag $|\Delta \varepsilon_{1st,cyc}|$ null ergeben, Gleichung 7.9.

$$|\Delta \varepsilon_{1st,cyc}| = 0 \quad \text{für } \sigma_{a,1st} < \sigma_{\text{limit}} \quad (7.9)$$

Wird die Grenze des transienten Werkstoffverhaltens überschritten, steigt der Betrag $|\Delta \varepsilon_{1st,cyc}|$ an.

Für die drei Werkstoffzustände werden die jeweiligen Abstände der Spannungs-Dehnungskurven $|\Delta \varepsilon_{1st,cyc}|$ für jede Probe einzeln ermittelt. Ausgewählt werden nur Proben, die auch einen signifikanten plastischen Anteil über den gesamten Bereich der Lebensdauer zeigen und deren E-Modul eindeutig bestimmt werden konnte. Für den Auslagerungszustand T4 zeigt sich, dass keine der Kriterien angewandt werden können, da der E-Modul hier nur an Proben mit makroskopisch elastischem Werkstoffverhalten einwandfrei ermittelt werden konnte. Da die auftre-

tende Verfestigung schon bei sehr geringen Spannungsamplituden einsetzt, wird beim Zustand T4 die Auswertung auch an Proben mit sehr geringem makroskopisch plastischem Anteil ausgewertet. Dies wird später bei der Auswertung der Streuung mit berücksichtigt betrachtet.

Der Abstand der Erstbelastungskurve und der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve $\Delta\varepsilon_{1st,cyc}$ wird dazu in Diagramm mit der Spannungsamplitude der Erstbelastungskurve $\sigma_{a,1st}$ visualisiert und dargestellt, Abbildung 7.2 und Abbildung A.13 und A.14 im Anhang.

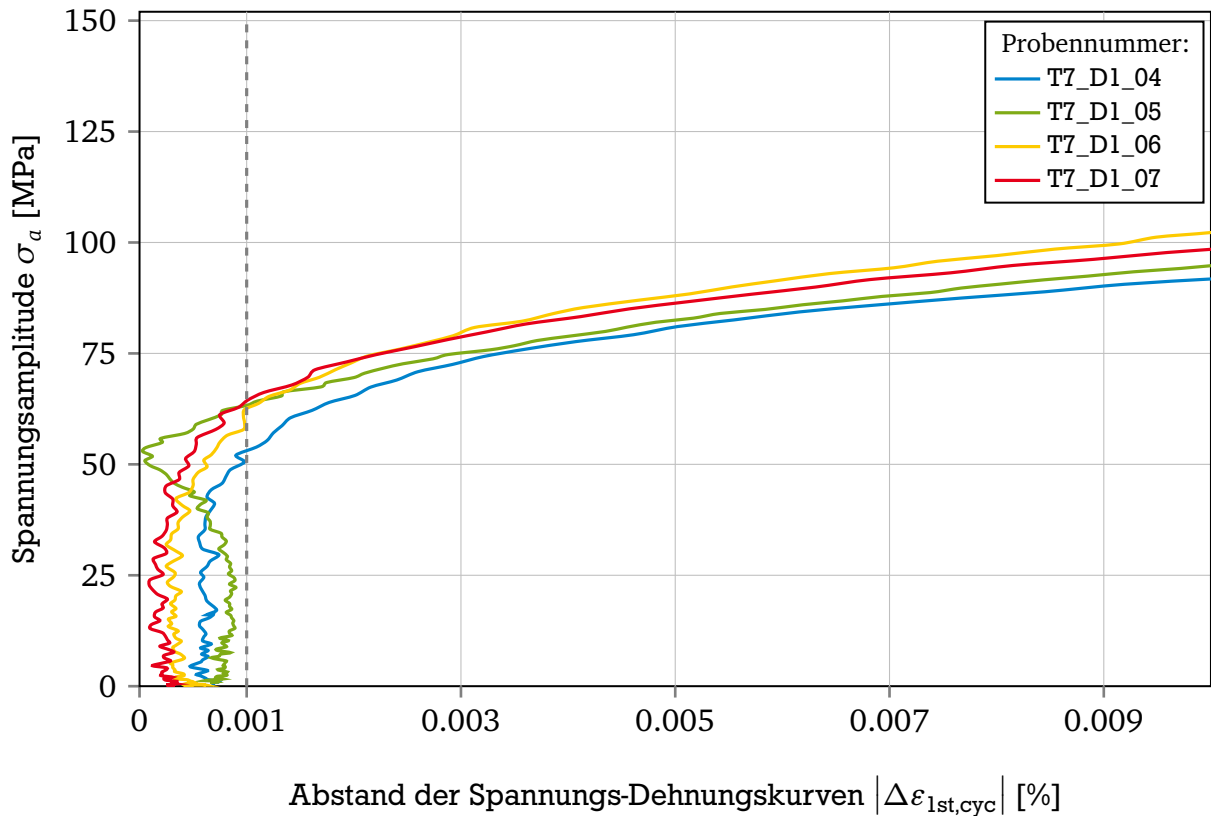


Abbildung 7.2.: Abstände der zyklischen und der statischen Spannungs-Dehnungskurve $|\Delta\varepsilon_{1st,cyc}|$ für den Werkstoffzustand T7 und Darstellung der Transienzgrenze

Der Anfangsbereich dieser Kurven zeichnet sich durch ein geringes Messrauschen um $|\Delta\varepsilon_{1st,cyc}| = 0$ aus. Im weiteren Verlauf der Kurve kann ein signifikantes Abknicken der Kurve wahrgenommen werden, das auf eine beginnende Trennung der Erstbelastungskurve und der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve hinweist. Um den Einfluss des Messrauschens auf die Bestimmung der Transienzgrenze zu vermeiden, wird das erstmalige Überschreiten des Wertes von $|\Delta\varepsilon_{1st,cyc}| = 0,001$ als Transienzgrenze festgesetzt. Diese Transienzgrenze $\Delta\varepsilon_{0,001}$ (Gleichung 7.10) ist als gestrichelte Linie in der Abbildung 7.2 beispielhaft für den Auslagerungszustand T7 und im Anhang in den Abbildungen A.13 und A.14 eingezeichnet. Die so erstellten Werte sind in den Tabellen A.27 bis A.29 zusammengefasst.

$$\Delta\varepsilon_{0,001} = |\Delta\varepsilon_{1st,cyc}| = 0,001 \quad \text{für } \sigma_{a,1st} = \sigma_{\text{limit}} \quad (7.10)$$

Die Dehnungsamplitude für die Transienzgrenze kann aus der Gleichung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve ermittelt werden, Gleichung 7.11.

$$\varepsilon_{\text{limit}} = \frac{\sigma_{\text{limit}}}{E} + \left(\frac{\sigma_{\text{limit}}}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (7.11)$$

Die für die einzelnen Zustände ermittelten Spannungsamplituden σ_{limit} und der Dehnungsamplituden $\varepsilon_{\text{limit}}$ am Punkt der Transienzgrenze $\Delta\varepsilon_{0,001}$ sind in Tabelle 7.2 aufgeführt.

Tabelle 7.2.: Werte für σ_{limit} und $\varepsilon_{\text{limit}}$ am Punkt der Transienzgrenze $\Delta\varepsilon_{0,001}$

	σ_{limit} [MPa]	$\varepsilon_{\text{limit}}$ [%]
T4	34,61	0,054
T6	111,45	0,174
T7	63,88	0,100

Das transiente Werkstoffverhalten hat jedoch selbst bei makroskopisch elastischem Werkstoffverhalten einen Einfluss auf die Lebensdauer und den Abknickpunkt der Dehnungswöhlerlinie der einzelnen Zustände, da sich durch die transienten Effekte der stabilisierte Werkstoffzustand entweder schneller oder langsamer einstellt. Die Transienzgrenze kann somit nicht als alleiniges Kriterium zum Abknicken der Dehnungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich herangezogen werden, da in diesem Punkt auch mikroskopisch keine Ver- und Entfestigungsvorgänge stattfinden. Ein Faktor, der die Ver- oder Entfestigung bewertet, muss deshalb in die Ermittlung des Abknickpunktes zum dritten Bereich mit einfließen, der das Ver- und Entfestigungsverhalten bei makroskopisch elastischer Dehnung mit abbildet. Ein Anzeichen für ver- oder entfestigendes Verhalten ist das unterschiedliche Abknicken der Erstbelastungskurve und der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve zum plastischen Bereich. Zur Auswertung der zyklischen Ver- oder Entfestigung bietet sich deshalb die Bildung des Verhältnisses der quasi-statischen Ersatzstreckgrenze $R_{p0,01}$ und der zyklischen Ersatzstreckgrenze $R'_{p0,01}$ an, um den zyklischen Verfestigungsfaktor zu ermitteln, für den die Bezeichnung Θ' gewählt wird, Gleichung 7.12.

$$\Theta' = \frac{R'_{p0,01}}{R_{p0,01}} \quad (7.12)$$

Die Dehnung am Abknickpunkt der Wöhlerlinie in den dritten Bereich $\varepsilon_{a,k}$ ergibt sich somit als Produkt aus zyklischem Verfestigungsfaktor Θ' und der Dehnung an der Transienzgrenze $\varepsilon_{\text{limit}}$, Gleichung 7.13.

$$\varepsilon_{a,k} = \Theta' \cdot \varepsilon_{\text{limit}} \quad (7.13)$$

Für die Auswertung werden die gleichen Proben verwendet wie für die Auswertung der Transienzgrenze, da auch die Ersatzstreckgrenze vom E-Modul abhängt.

Die für $R'_{p0,01}$ und $R_{p0,01}$ ermittelten Werte so wie der zyklische Verfestigungsfaktor Θ' und die Dehnung am Abknickpunkt der Wöhlerlinie in den dritten Bereich $\varepsilon_{a,k}$ sind in Tabelle A.22 bis A.24 im Anhang dargestellt.

7.3 Erstellen der Parameter der Dehnungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich

Zum Erstellen der vollständigen Dehnungswöhlerlinie bis in den Langzeitfestigkeitsbereich wird die Schwingspielzahl $N_{\varepsilon k}$ am Anknüpfungspunkt der Dehnungswöhlerlinie benötigt. Diese ergibt sich aus der umgeformten Gleichung des Verlaufs der Dehnungswöhlerlinie für den Bereich 2 am Abknickpunkt der Dehnungswöhlerlinie zum Bereich 3. Da in diesem Bereich mit einem makroskopisch elastischen Spannungs-Dehnungsverhalten zu rechnen ist, wird nur der elastische Anteil der Dehnungswöhlerlinie betrachtet, Gleichung 7.14.

$$\varepsilon_{a,e} = \frac{\sigma'_{f_2}}{E} \cdot (2 \cdot N_A)^{b_2} \quad (7.14)$$

Durch Auflösen der Gleichung 7.14 für den Bereich 2 nach N_A und Gleichsetzen von $\varepsilon_{a,e} = \varepsilon_{a,k}$ ergibt sich die Schwingspielzahl $N_{\varepsilon k}$ am Übergangsbereich zwischen Bereich 2 und 3 nach Gleichung 7.15.

$$N_{\varepsilon k} = \left(\frac{\varepsilon_{a,k} \cdot E}{\sigma'_{f_2} \cdot 2^{b_2}} \right)^{\frac{1}{b_2}} \quad (7.15)$$

Für die einzelnen Wärmebehandlungszustände T4, T6 und T7 ergeben sich hierdurch unterschiedliche Anknüpfungspunkte für den dritten Bereich der Dehnungswöhlerlinie, Tabelle 7.3.

Tabelle 7.3.: Schwingspielzahlen am Abknickpunkt zum Bereich 3 der Dehnungswöhlerlinie nach tri-linearer Auswertung

	T4	T6	T7
$N_{\varepsilon k}$	$3,8 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^6$	$8,1 \cdot 10^7$

$$\varepsilon_{a,e} = \varepsilon_{a,k} \cdot \left(\frac{N_A}{N_{\varepsilon k}} \right)^{b_3} \quad \text{für } N_A > N_{\varepsilon k} \quad (7.16)$$

Während das Abknicken der Dehnungswöhlerlinie in den dritten Bereich für den Auslagerungszustand T4 bereits bei $3,8 \cdot 10^5$ Schwingspielen und für den Auslagerungszustand T6 bei $1,8 \cdot 10^6$ Schwingspielen erfolgt, liegt das Abknicken der Dehnungswöhlerlinie für den Zustand T7 erst bei $8,1 \cdot 10^7$ Schwingspielen.

Die Dehnungswöhlerlinie kann nun mit den so ermittelten Werten für $N_A > N_{\varepsilon k}$ nach Gleichung 7.16 für die einzelnen Wärmebehandlungszustände für den dritten Bereich aufgestellt werden. Somit können die Dehnungswöhlerlinien für den ganzen Bereich vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich dargestellt werden.

7.4 Darstellung des Verlaufs der Dehnungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich

Für die Darstellung des Verlaufs der errechneten tri-linearen Dehnungswöhlerlinie im dritten Bereich sollen als Referenz Versuchspunkte im Langzeitfestigkeitsbereich mit in die Diagramme eingetragen werden, die über den E-Modul und den Frequenzeinfluss auf die Versuchsfrequenz

der dehnungsgeregelten Versuche umgerechnet worden sind. Für den Zustand T4 wurde jedoch kein Frequenzeinfluss festgestellt und für T7 kann aufgrund von fehlenden Versuchspunkten bei 20 kHz keine Funktion des Frequenzeinflusses aufgestellt werden. Daher werden in diesem Fall als Referenz die in Dehnungen transformierten, spannungsgeregelten Versuchsergebnisse bei 140 Hz als Vergleich mit in die Dehnungswöhlerlinie eingezeichnet.

Somit kann die vollständige Dehnungswöhlerlinie für den Zustand T4 aufgestellt und in Abbildung 7.3 dargestellt werden. Die umgerechneten spannungsgeregelten Punkte liegen auf der neu entwickelten Dehnungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich, Abbildung 7.3. Durch die große Streuung der aus den Versuchsdaten mit geringem plastischen Anteil ermittelten Werte der Transienzgrenze $T_{\sigma_{\text{limit}}} = 2,37$ und der Ersatzdehngrenze $T_{\sigma_{Rp0,01}} = 1,53$ kann kein sinnvolles Streuband mit in das Diagramm eingezeichnet werden.

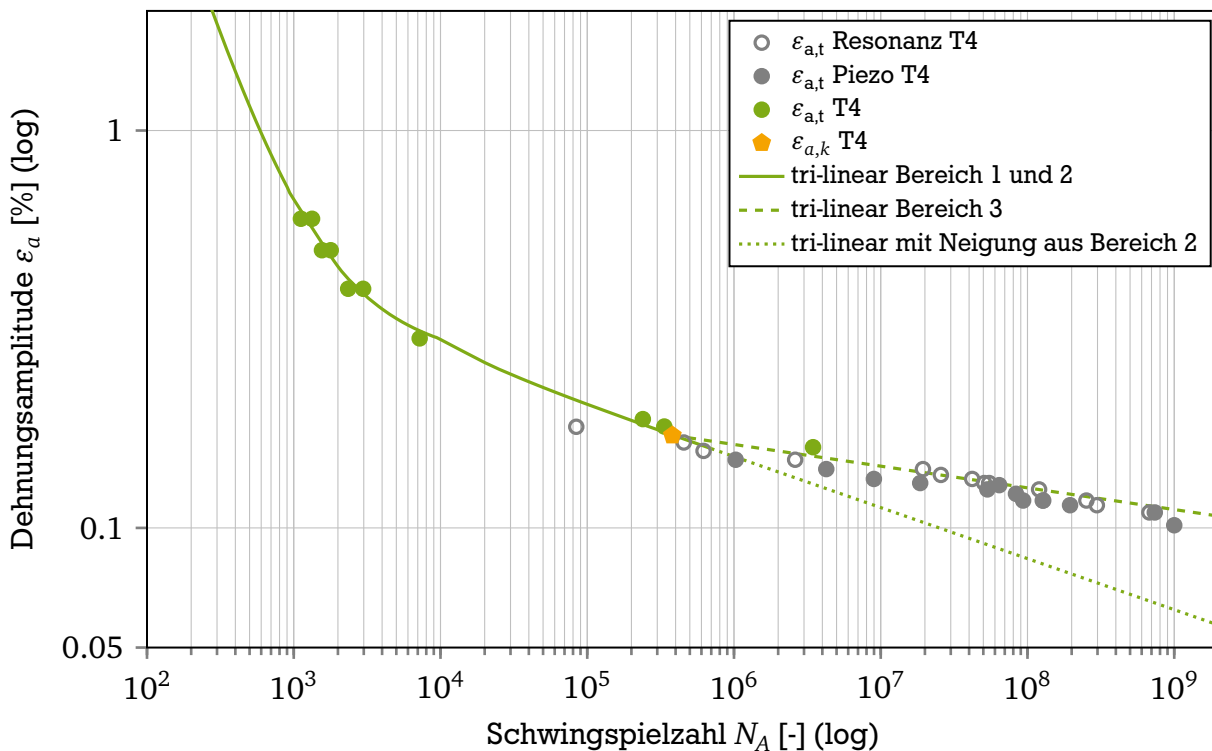


Abbildung 7.3.: Dehnungswöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich für EN AW-6060 Auslagerungszustand T4

Für den Zustand T6 ist die vollständige Dehnungswöhlerlinie in Abbildung 7.4 dargestellt. Es kann ein deutliches Abknicken der Dehnungswöhlerlinie zum dritten Bereich erkannt werden. Zum Vergleich der Ergebnisse mit den spannungsgeregelten Versuchen können für den Zustand T6 nicht nur die in Dehnungen transformierten, spannungsgeregelt aufgenommenen Werte mit eingezeichnet werden, sondern auch die vom Frequenzeinfluss bereinigten weiteren spannungsgeregelten Versuche als Dehnungen eingetragen werden. Da die Versuchsergebnisse der dehnungsgeregelten Versuche mit einer Frequenz von 0,5 Hz bis 5 Hz aufgenommen wurden, wird in Tabelle 7.4 die durch den Frequenzeinfluss bewirkte Änderung der Dehnungsamplitude zwischen 5 Hz und 140 Hz $\Delta\epsilon_{a,5\text{Hz},140\text{Hz}}$ für den Zustand T6 berechnet. Die Spannungsamplitude bei 5 Hz berechnet sich dabei nach der Gleichung 6.2 und den in Tabelle 6.9 zuvor ermittelten Parametern. Dabei ergibt sich ein Unterschied in der Dehnungsamplitude von $\Delta\epsilon_{a,5\text{Hz},140\text{Hz}} = 0,009\%$.

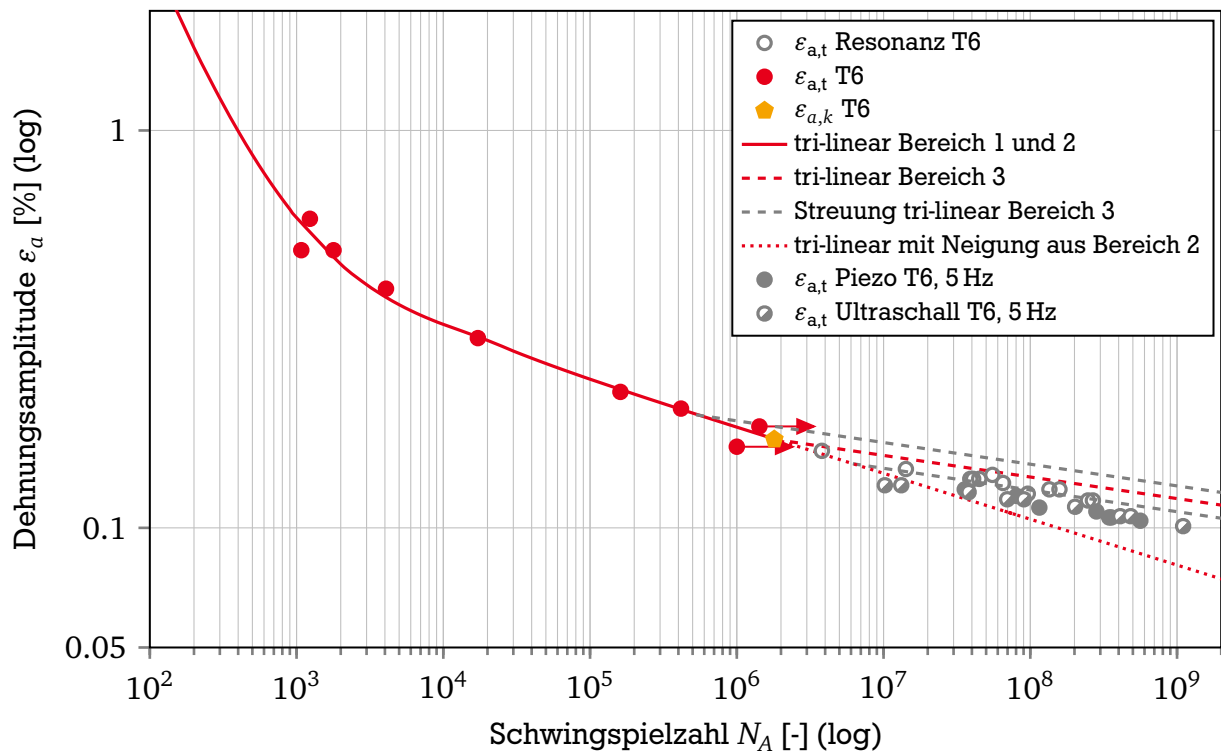


Abbildung 7.4.: Dehnungswöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich für EN AW-6060 Auslagerungszustand T6

Tabelle 7.4.: Änderung der Dehnungsamplitude verursacht durch den Frequenzeinfluss zwischen 5 Hz und 140 Hz bei $N = 1 \cdot 10^8$

$\sigma_{a,140\text{Hz}}$	$\varepsilon_{a,140\text{Hz}}$	$\sigma_{a,5\text{Hz}}$	$\varepsilon_{a,5\text{Hz}}$	$\Delta\varepsilon_{a,5\text{Hz},140\text{Hz}}$
80 MPa	0,125 %	74,3 MPa	0,116 %	0,009 %

In die Lage des Abknickpunktes zum dritten Bereich $\varepsilon_{a,k}$ gehen die Streuung der Transienzgrenze $T_{\sigma_{\text{limit}}} = 1,29$ und der Ersatzdehngrenze $T_{\sigma_{Rp0,01}} = 1,03$ ein. Durch Kombination der beiden Streuungen lassen sich die möglichen Abweichungen des Abknickpunktes zum dritten Bereich $\varepsilon_{a,k}$ bestimmen und die Streubänder der errechneten Wöhlerlinie im dritten Bereich einzeichnen.

Je nachdem wie groß der Unterschied der Neigung der Dehnungswöhlerlinie im Bereich 2 und Bereich 3 ausfällt, ergibt sich ein Abstand der Streubänder deren Verhältnis sich zu $T_{\varepsilon,3} = 1,16$ berechnet. Diese Streuung ist somit nur geringfügig höher als die Streuung der Versuchsdaten, die mit $T_{\sigma} = 1,07$ ausgewertet wurden, Tabelle 7.5.

Tabelle 7.5.: Auswertung der Streubänder des dritten Bereiches der tri-linearen Wöhlerlinie bei $N = 1 \cdot 10^8$

$\varepsilon_{a,3,50\%}$	$\varepsilon_{a,3,10\%}$	$\varepsilon_{a,3,90\%}$	$T_{\varepsilon,3}$
0,134 %	0,144 %	0,124 %	1,16

Werden die einzelnen Dehnungen der errechneten 50 % Dehnungswöhlerlinie im Bereich 3 mit $\varepsilon_{a,3,50\%} = 0,134\%$ und der umgerechneten und frequenzbereinigten Dehnungswöhlerlinie $\varepsilon_{a,5\text{Hz}} = 0,116\%$ mit einander bei $N = 10^8$ Schwingspielen verglichen, zeigt sich lediglich ein

Unterschied von 0,018 %. Dies zeigt, dass Versuch und Berechnung im selben, engen Bereich liegen.

Der Verlauf der Dehnungswöhlerlinie im dritten Bereich kann sehr gut mit den Ergebnissen aus den spannungsgeregelten Wöhlerversuchen korreliert werden.

Die vollständige Dehnungswöhlerlinie für den Zustand T7 ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Der Verlauf der Dehnungswöhlerlinie im dritten Bereich trifft die Versuchspunkte der 140 Hz Versuche und kann ebenfalls sehr gut mit den Ergebnissen aus den spannungsgeregelten Wöhlerversuchen korreliert werden. Das Abknicken der Dehnungswöhlerlinie in den dritten Bereich ist dabei nicht zu erkennen, da sich die Neigungen der elastischen Dehnungswöhlerlinie der einzelnen Bereiche beim Zustand T7 nicht stark voneinander unterscheiden, vgl. Tabelle 7.1. Dies hängt mit dem zyklischen Werkstoffverhalten des Zustands T7 zusammen, der so das klassische Verhalten und den klassischen Verlauf der Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN, MANSON und BASQUIN abbildet. Die Streuung sowohl der Transienzgrenze $T_{\sigma_{\text{limit}}} = 1,18$ als auch der Ersatzdehngrenze $T_{\sigma_{R_{p0,01}}} = 1,07$ ist hier ebenfalls gering. Durch die geringe Abweichung der Neigungen der errechneten und der weitergeführten Dehnungswöhlerlinie lassen sich keine Unterschiede zwischen den Streubändern und der Wöhlerlinie erkennen, da diese durch die gleiche Neigung der Bereiche 2 und 3 übereinander liegen.

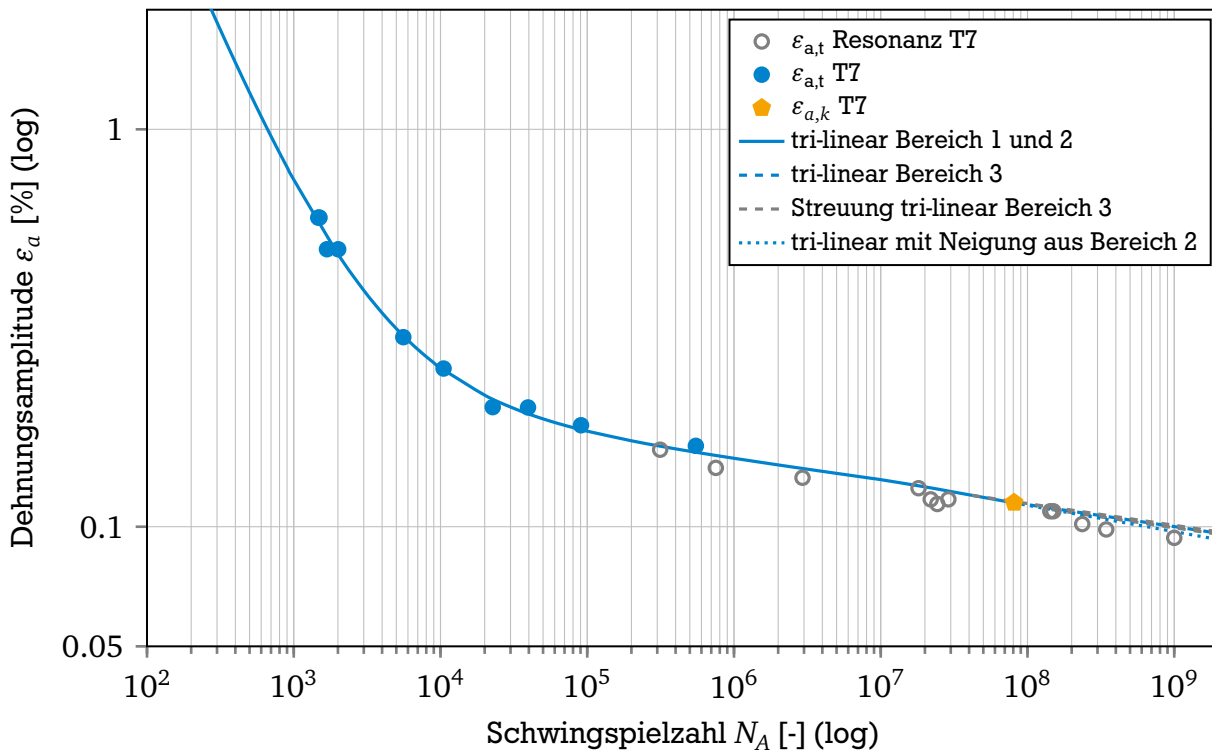


Abbildung 7.5.: Dehnungswöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich für EN AW-6060 Auslagerungszustand T7

Für die Beschreibung des dritten Bereichs der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie nach Gleichung 7.1 muss lediglich σ'_{f_3} bei $N_a = 0,5$ Schwingspielen bestimmt werden. Dies erfolgt durch Gleichung 7.17.

$$\sigma'_{f_3} = E \cdot \varepsilon_{a,k} \cdot \left(\frac{0,5}{N_{\varepsilon k}} \right)^{b_3} \quad (7.17)$$

Die Ergebnisse für σ'_{f_3} für die einzelnen Zustände sind in Tabelle 7.6 eingetragen.

Tabelle 7.6.: Ergebnisse für den Schwingfestigkeitskoeffizient für tri-Lineare Dehnungswöhlerlinie σ'_{f_3} für EN AW-6060 T4, T6 und T7

	T4	T6	T7
σ'_{f_3} [MPa]	229,37	244,09	206,23

7.5 Fazit der Dehnungswöhlerlinien im Langzeitfestigkeitsbereich

Für die Dehnungswöhlerlinien im Langzeitfestigkeitsbereich lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Der Abknickpunkt der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie kann mit Hilfe der Kombination der Erstbelastungskurve und der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve also des statischen und zyklischen Werkstoffverhalten abgeleitet werden.
- Der Abknickpunkt in den dritten Bereich der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie ergibt sich dabei aus der Lage der Transienzgrenze und dem individuellen Ver- bzw. Entfestigungsverhalten.
- Treten keine Ver- oder Entfestigungseffekte bei zyklischer Beanspruchung auf, erzielt die Auswertung nach tri-linear die gleichen Ergebnisse wie die Methode nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und kann somit auch für Werkstoffe und Werkstoffzustände angewendet werden, die kein transientes Werkstoffverhalten zeigen.
- Die Neigungen der elastischen Dehnungswöhlerlinien im Langzeitfestigkeitsbereich b_3 können aus hochfrequenten, spannungsgeregelten Versuchen im Langzeitfestigkeitsbereich übernommen werden.
- Sollten die Neigungen für den Langzeitfestigkeitsbereich nicht aus hochfrequenten Versuchen zur Verfügung stehen, können diese aus den Neigungen der elastischen Dehnungswöhlerlinie aus dem ersten Bereich über $b_1 = b_3$ abgeschätzt werden.
- Bei Verwendung der Abschätzung $b_1 = b_3$ genügen wenige Stützpunkte aus hochfrequenten Schwingfestigkeitsversuchen und die Umrechnung über den Verlauf des Frequenzeinflusses, um eine Aussage über den Verlauf der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich machen zu können.

Daraus ergibt sich folgendes Vorgehen für die Ermittlung von zyklischen Kennwerten für Aluminiumknetlegierungen:

Die zyklischen Kennwerte werden in dehnungsgeregelten Versuchen zwischen 10^2 und 10^6 Schwingspielen mit niederfrequenten Wöhlerversuchen aufgenommen. Die Auswertung der Schwingfestigkeitsergebnisse erfolgt dann nach dem tri-linearen Ansatz für die Bereiche 1 und 2. Für die Beschreibung der Neigung des dritten Bereichs kann entweder durch die elastische Neigung des ersten Bereich der Wöhlerlinie abgeschätzt werden oder mit hochfrequenten spannungsgeregelten Versuchen belegt werden.

Durch diese Vorgehensweise können zyklische Materialkennwerte auch bis in den Langzeitfestigkeitsbereich in kürzester Zeit ermittelt werden. Mit der beschriebenen Vorgehensweise kann bis zu mehrere Jahre Versuchszeit eingespart werden und so die Ableitung von zyklischen Kennwerten bis in den Langzeitfestigkeitsbereich in einem wirtschaftlich ertragbaren Zeitrahmen realisiert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Schon in den frühen Entwicklungsphasen von sicherheitsrelevanten Bauteilen ist eine Abschätzung der Lebensdauer unerlässlich. Da zu diesem Zeitpunkt noch keine Prototypen für Bauteilversuche zur Verfügung stehen, muss die Lebensdauer virtuell über Simulationen abgeschätzt werden. Diese werden anhand von zyklischen Werkstoffkennwerten, die an Werkstoffproben ermittelt werden, durchgeführt.

Für eine zuverlässige Lebensdauerabschätzung und damit eine optimale Ausschöpfung des Leichtbaupotenzials werden zyklische Werkstoffkennwerte vom Kurzzeitfestigkeitsbereich mit sehr hohen Lasten und wenigen Schwingspielen bis hin zum Langzeitfestigkeitsbereich mit niedrigen Lasten und einer sehr hohen Anzahl von bis zu $N = 10^9$ Schwingspielen benötigt. Diese zyklischen Werkstoffkennwerte werden für den Kurzzeitfestigkeitsbereich aufgrund von großen plastischen Dehnungsanteilen mit dehnungsgeregelten Versuchen aufgenommen, während Versuchsergebnisse für den Langzeitfestigkeitsbereich mit spannungsgeregelten Versuchen ermittelt werden.

Für die Aufnahme und die Verwendung der zyklischen Werkstoffkennwerte bestehen jedoch noch Herausforderungen:

So werden die zyklischen Werkstoffkennwerte nach Stand der Technik in verschiedenen Wöhlerlinienformaten, nämlich der Spannungswöhlerlinie und der Dehnungswöhlerlinie bereitgestellt. Belastungen die über die Lebensdauer auf die Bauteile einwirken bestehen jedoch aus einer Kombinationen von wenigen hohen und vielen kleinen Lasten, sodass für die Verwendung in der Lebensdauerabschätzung eine durchgehende Bemessungsspannungs- oder Bemessungsdehnungswöhlerlinie wünschenswert wäre.

Dehnungswöhlerlinien lassen sich technisch bedingt jedoch nur sinnvoll in Bereichen mit hoher plastischer Dehnung aufnehmen. Dabei können nur niedrige Prüffrequenzen bis maximal 10 Hz angewendet werden, sodass lediglich $N = 10^6$ Schwingspiel erreicht werden können. Bei Aluminiumlegierungen führen transiente Werkstoffeffekte, also das zyklische Ver- oder Entfestigungsverhalten des Werkstoffes über die Lebensdauer, zu ungenauen Ergebnissen bei der Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN [Coff43, Mans65, Basq10]. Eine Alternative dazu ist die tri-lineare Dehnungswöhlerlinie, die das Werkstoffverhalten von Werkstoffen mit transientem Werkstoffverhalten besser abbildet [Wage07]. Der Verlauf der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie ist bisher aufgrund fehlender Versuchsergebnisse noch nicht für den Langzeitfestigkeitsbereich erforscht.

Um Versuchsergebnisse in einer wirtschaftlich ertragbaren Zeit im Labor aufnehmen zu können, werden hohe Versuchsfrequenzen benötigt. Während Versuche mit einer Versuchsfrequenz von $f = 5$ Hz noch mehrere Jahre benötigen würden, um eine Probe im Bereich von $N = 10^9$ Schwingspielen zu ermüden, ist dies mit einer Prüftechnik, die eine Versuchsfrequenz von $f = 1000$ Hz ermöglicht, in 11 Tagen zu erreichen, vgl. Tabelle 1.1.

Spannungswöhlerlinien lassen sich mit hohen Prüffrequenzen aufnehmen. Eine Aussage über den Kurzzeitfestigkeitsbereich ist aufgrund fehlender Informationen über die plastischen Dehnungsanteile und die eingeschränkte Regelgenauigkeit der spannungsgeregelten Versuche in diesem Bereich nicht möglich, vgl. Kapitel 2.5.

Zeigt der Werkstoff keinen Einfluss der Prüffrequenz auf die Lebensdauer und sind nur elastische Dehnungsanteile vorhanden, wie dies bei hohen Schwingspielzahlen ab $N = 10^6$ Schwingspielen angenommen wird, können die hochfrequent aufgenommenen spannungsgeregelten Kennwerte über das HOOKE'sche Gesetz in Werte der Dehnungswöhlerlinie umgerechnet werden.

Einige Aluminiumlegierungen zeigen jedoch bei zyklischer Beanspruchung mit hohen Frequenzen einen Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Lebensdauer. Je höher die Versuchsfrequenz bei gleicher Belastungshöhe gewählt wird, desto höher ist auch die resultierende Lebensdauer. Dabei wird der Zusammenhang vermutet, dass mit statischer Festigkeit die Ausprägung des Frequenzeinflusses ebenfalls ansteigt [Engl07]. Eine Funktion, die den Verlauf des Frequenzeinflusses auf die Lebensdauer beschreibt, ist bisher nicht vorhanden. Neben Darstellungen, die ein immer stärkeres Ansteigen der ertragbaren Spannungsamplitude mit steigender Frequenz vermuten lassen [Sons03, Rada07], gibt es Aussagen, die eine Grenze des Anstiegs des Frequenzeinflusses vermuten [Lair82], vgl. Kapitel 2.6.

Aus dem Stand der Technik haben sich deshalb folgende Fragestellungen ergeben:

- Ist eine Wöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich für Aluminiumlegierungen möglich und welches Wöhlerlinienmodell kann dafür ausgewählt werden?
- Kann eine Funktion gefunden werden, mit der ein Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Lebensdauer beschrieben werden kann? Hat diese Funktion eine obere Grenze?
- Hat die statische Festigkeit bei gleicher chemischer Zusammensetzung aber verschiedenen Wärmebehandlungs- bzw. Auslagerungszuständen einen Einfluss auf die Lebensdauer?

Für die Untersuchung dieser Fragestellungen wurde die ausscheidungshärtbare Aluminiumknetlegierung in den Wärmebehandlungszuständen unteraltert (T4), maximal ausgehärtet (T6) und überaltert (T7) mit den Versuchsfrequenzen 140 Hz, 700 Hz und 20 kHz im Schwingzahlbereich zwischen $N = 10^6$ und $N = 10^9$ mit gleichen, elektrolytisch polierten Oberflächen ermüdet. Zudem wurde eine Materialcharakterisierung mit dehnungsgeregelten Versuchen und niedrigen Frequenzen von maximal 5 Hz im Kurzzeitfestigkeitsbereich durchgeführt. Dabei wurden für die unterschiedlichen Anwendungen und Frequenzen verschiedene Prüfmaschinen, wie ein servohydraulischer Prüfstand, ein Resonanzpulsler, ein Piezoprüfstand und eine Ultraschallschwingfestigkeitsmaschine, eingesetzt, deren Besonderheiten im Betrieb und Regelung beachtet und ausgenutzt wurden, vgl. Kapitel 5.

Eine zentrale Rolle bei der Auswertung der dehnungsgeregelten Versuche und die Umrechnung von Spannungen in Dehnungen im linear-elastischen Bereich ist der Elastizitätsmodul. Dieser wurde in dieser Untersuchung nicht aus separaten statischen Versuchen ermittelt, sondern direkt aus der Erstbelastung E_{stat} und der stabilisierten Hysterese E_{zykl} der dehnungsgeregelten Versuche abgeleitet. Für diese Ableitung des E-Moduls wird ein in [Hess91] vorgestellter Algorithmus, der für die Ermittlung des E-Modul an statischen Versuchen entwickelt worden ist, auf die Auswertung des E-Moduls der zyklischen Versuche übertragen. Dies führt zu der Erkenntnis, dass der E-Modul mit $E_{\text{stat}} = E_{\text{zykl}} = 64 \text{ GPa}$ als konstant für alle Zustände und auch für Umrech-

nung von Spannungen und Dehnungen bei hohen Lebensdauern im Langzeitfestigkeitsbereich genutzt werden darf, vgl. Kapitel 6.1.

Ein Vergleich der Auswertungen der dehnungsgeregelten Versuche nach COFFIN, MANSON und BASQUIN mit der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie zeigt, dass die Zustände T4 und T6, die ein transientes Werkstoffverhalten zeigen, mit der Auswertung nach dem tri-linearen Dehnungswöhlerlinien-Konzept besser abgebildet werden können. Der Werkstoffzustand T4 zeigt dabei ein so starkes verfestigendes zyklisches Werkstoffverhalten, dass die zyklische Streckgrenze $R'_{p0,01} = 171 \text{ MPa}$ sogar noch knapp über der Zugfestigkeit von $R_m = 161 \text{ MPa}$ liegt. Der Werkstoffzustand T7 zeigt ein neutrales zyklisches Werkstoffverhalten, welches mit beiden Verfahren gleich gut abgebildet werden kann. Dies lässt den Schluss zu, dass die tri-lineare Dehnungswöhlerlinie auch für konventionelle Werkstoffe ohne transientes Werkstoffverhalten genutzt werden kann, vgl. Kapitel 6.2.

Werden die Versuchsergebnisse, die mit einer Versuchsfrequenz von $f = 140 \text{ Hz}$ und $f = 700 \text{ Hz}$ im Bereich zwischen $N = 10^6$ und 10^9 Schwingspielen für die Zustände T4, T6 und T7 aufgenommen wurden, im Wöhlerdiagramm eingetragen und mit den aus dem Stand der Technik vorgeschlagenen Neigungen der Wöhlerlinien von $k^* = 22$ [Sons05] und $k^* = 15$ bis $N_G = 10^8$ [FKM12] ausgewertet, zeigt sich für alle Zustände und für beide vorgegebenen Neigungen eine ähnliche durchschnittliche Streubreite von $T_\sigma = 1,11$. Dies lässt den Schluss zu, dass alle Auslagerungszustände bei den Frequenzen $f = 140 \text{ Hz}$ und $f = 700 \text{ Hz}$ die gleiche Neigung haben. Eine gemeinsame Auswertung der sechs Versuchsreihen im normierten Wöhlerdiagramm bestätigt die Annahme. Es ergeben sich deshalb im Bereich zwischen $N = 10^6$ und 10^9 Schwingspielen für die einzelnen Zustände parallele Wöhlerlinien mit der Neigung $k^* = 18,3$ bei einer engen Streuspanne von $T_\sigma = 1,07$.

Die Ultraschallschwingfestigkeitsversuche bei einer Versuchsfrequenz von $f = 20 \text{ kHz}$ wurden für die Zustände T4 und T6 dehnungsgesteuert aufgenommen, über das E-Modul in Spannungen umgerechnet und mit den aus dem normierten Wöhlerdiagramm ermittelten Neigung verglichen. Dabei fällt auf, dass sich die Versuchsergebnisse des Zustands T6 sehr gut mit der Neigung $k^* = 18,3$ abbilden lassen. Für den Zustand T4 ist dies aufgrund von transienten Werkstoffeffekten, die bei der Anwendung der Ultraschallschwingfestigkeitsprüfung ausgeschlossen werden müssen, nicht möglich.

Durch die parallel verlaufenden Streubänder können die Versuchsergebnisse repräsentativ bei einer festgelegten Schwingspielzahl von $N = 10^8$ verglichen werden. Für den Zustand T4 kann kein Frequenzeinfluss ermittelt werden. Demgegenüber steigt die Schwingfestigkeit für den Zustand T6 zwischen 140 Hz und 700 Hz um 16% und zwischen 700 Hz und 20 kHz um 7% an. Dies zeigt die deutliche Tendenz eines Abflachen des Frequenzeinflusses zu sehr hohen Frequenzen. Für den Zustand T7 steigt die ertragbare Spannungsamplitude zwischen 140 Hz und 700 Hz um 12% an. Der Zustand T7 konnte für Versuche bei 20 kHz nicht berücksichtigt werden, sodass eine Einschätzung des Frequenzeinflusses zwischen 700 Hz und 20 kHz für den Zustand T7 nicht möglich ist.

Aufgrund des in Richtung der hohen Frequenzen abflachenden Verlaufs des Frequenzeinflusses wird zur Abbildung des Frequenzeinflusses eine natürliche Sättigungsfunktion für begrenztes Wachstum gewählt, Kapitel 6.3.5, Gleichung 6.2.

$$\sigma_{a,f,N} = \sigma_{a,f \rightarrow \infty, N} - \left(\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N} - \sigma_{a,f \rightarrow 0, N} \right) \cdot e^{(-k_{gr} \cdot f)} \quad (6.2)$$

Die Funktion bildet beim Vorliegen von Wöhlerlinien mit mehreren Frequenzen den Frequenzeinfluss bei einer bestimmten Schwingspielzahl ab. Dabei ist die Spannungsamplitu-

de $\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ die obere Grenze der Funktion bei sehr hohen Frequenzen $f \rightarrow \infty$ und die Spannungsamplitude $\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ die untere Grenze der Funktion bei $f \rightarrow 0$. Anhand der Daten aus [Harr59, Harr61], die Wöhlerlinien mit verschiedenen Frequenzen zwischen 10 Hz und 1000 Hz beinhalten, wird eine Wachstumsrate $k_{gr} = 0,003$ ermittelt. Für die Aluminiumlegierung EN AW-6060 im Zustand T6 lässt sich mit Hilfe der Ergebnisse der Versuchsreihen bei den drei Frequenzen, $f = 140$ Hz, 700 Hz und 20 kHz, eine Wachstumsrate von $k_{gr} = 0,002$ ermitteln. Dieser Verlauf belegt die Begrenzung des Frequenzeinflusses auf eine obere Grenze. Es wird empfohlen, in der grafischen Darstellung die Achse der Frequenz linear zu skalieren, da bei logarithmischer Skalierung, siehe [Sons03, Rada07], ansonsten Fehlinterpretationen im Verlauf des Frequenzeinflusses möglich sind.

Zwischen den verschiedenen Frequenzen kann anhand der Funktion des Frequenzeinflusses die zu erwartende Spannungsamplitude bei einer bestimmten Schwingungszahl für eine andere Frequenz ausgerechnet werden. Mit Verhältnis der beiden der Spannungsamplituden kann ein Umrechnungsfaktor $\Delta f_{\text{influence}}$ errechnet werden, Gleichung 6.4, mit dem Spannungsamplituden von der einen in die andere Frequenz umgerechnet werden können. Versuchspunkte von parallel verlaufenden Wöhlerlinien mit gleicher Neigung lassen sich so schnell zu anderen Frequenzen transformieren, vgl. Abbildung 6.32.

Auf Basis der erarbeiteten Erkenntnisse wird die tri-lineare Dehnungswöhlerlinie als geeignet angesehen, eine vom Kurzzeitsfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich durchgehende Bemessungsdehnungswöhlerlinie für die Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 aufzustellen. Hierzu wird die tri-lineare Dehnungswöhlerlinie in den Bereichen 1 und 2 aufgestellt. Die Erweiterung in den dritten Bereich erfolgt über die in Dehnungen umgerechneten spannungsgeregelten Versuchsergebnisse. Dies ist auf Basis des über die Lebensdauer konstanten E-Moduls und die Kenntnis des Verlaufes des Frequenzeinflusses möglich.

Zusätzlich wird ein weiteres Verfahren zum Aufstellen der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie im dritten Bereich aufgezeigt. Für die Zustände T6 und T7 stimmen die Neigungen der elastischen Dehnungsanteile des ersten Bereichs der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie mit der Neigung der Spannungswöhlerlinien im Langzeitfestigkeitsbereich überein. Sind keine Versuchsergebnisse im Langzeitfestigkeitsbereich vorhanden, kann somit die Neigung der Dehnungswöhlerlinie im dritten Bereich aus der Neigung der elastischen Dehnungsanteile aus dem ersten Bereich abgeleitet werden. Hierzu muss lediglich der Abknickpunkt in den dritten Bereich der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie über eine Betrachtung des transienten und statischen Werkstoffverhaltens abgeleitet werden. Für die Zustände T4 und T6, bei denen ein deutliches Abknicken in den dritten Bereich beobachtet werden kann, liegt der Abknickpunkt im Bereich zwischen $N = 5 \cdot 10^5$ und $N = 5 \cdot 10^6$ Schwingspielen. Dies deckt sich mit den in [Sons05] vorgeschlagenen Abknickpunkten bei spannungsgeregelten Versuchen für ungeschweißte Aluminiumknetlegierungen.

Die in der Zielsetzung aufgeworfenen Fragestellungen können nun beantwortet werden:

- Für eine durchgehende Bemessungswöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich für Aluminiumlegierungen ist möglich. Hierfür bietet sich die tri-lineare Dehnungswöhlerlinie an.
- Der Frequenzeinfluss kann mit einer Sättigungsfunktion für beschränktes Wachstum dargestellt werden. Somit können die hochfrequent aufgenommenen spannungsgeregelten Versuche auch bei bestehendem Frequenzeinfluss für in Dehnungen umgerechnet werden und so für die Erweiterung der Dehnungswöhlerlinie genutzt werden

-
- Die statische Festigkeit bei gleicher chemischer Zusammensetzung aber verschiedenen Wärmebehandlungs- bzw. Auslagerungszuständen hat einen Einfluss auf die Lebensdauer. Während sich beim Zustand T4 kein Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Lebensdauer nachweisen lässt, zeigen die Auslagerungszustände mit ausgeprägten Ausscheidungen einen Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Lebensdauer.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen für die Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 eine ganzheitliche Bewertung der Lebensdauer in einer Dehnungswöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich. Zudem werden bei der Anwendung der vorgestellten Konzepte Versuchszeit und damit Versuchskosten bei der Erstellung der Werkstoffkennwerte eingespart.

8.2 Ausblick

Die neuentwickelte Methode zur Abschätzung des Verlaufs der Dehnungswöhlerlinie ist bis jetzt nur für die ausscheidungshärtbare Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 gezeigt worden. In weiteren Untersuchungen muss die Übertragbarkeit auf weitere Werkstoffe gezeigt werden. Dabei sollte sich zunächst auf die Aluminiumlegierungen mit ähnlicher chemischer Zusammensetzung wie bei der ausscheidungshärtbaren Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 konzentriert werden, da diese in Studien ähnliche zyklische Eigenschaften gezeigt haben.

In einem weiteren Schritt ist zu prüfen, ob auch andere Aluminiumlegierungen oder andere metallische Werkstoffe mit ähnlichem transienten Werkstoffverhalten mit der vorgestellten Methode abgebildet werden können.

Für die Anwendung des vorgestellten Verlaufes des Frequenzeinflusses auf weitere Werkstoffe muss einmal für den jeweiligen Werkstoff die Funktion des Frequenzeinflusses ermittelt werden. Die Funktion des Frequenzeinflusses zeigt zwischen den Ergebnissen der Aluminiumlegierung in [Harr59, Harr61] und der Aluminiumlegierung EN AW-6060, bei denen von einem Einwirken der Umgebungsluft ausgegangen werden kann, einen sehr guten Zusammenhang. Eine Übertragbarkeit auf andere Aluminiumlegierungen ist sehr wahrscheinlich möglich, muss jedoch individuell nachgewiesen werden. Dabei ist der Frequenzbereich zwischen 100 und 1000 Hz besonders interessant für den Frequenzeinfluss, da hier der Frequenzeinfluss am ausgeprägtesten ist.

Für entsprechende Untersuchungen eignet sich besonders eine Prüftechnik, die Wöhlerlinien bei verschiedenen Frequenzen im Frequenzbereich zwischen 100 und 1000 Hz in möglichst kleinen Frequenzstufen erstellen kann. Für diese Untersuchungen erscheint die beschriebene Piezoprüftechnik besonders geeignet.

Ein Augenmerk sollte dabei auch auf die Ausprägung der Wachstumsrate k_{gr} gelegt werden. Auffallend ist, dass die Wachstumsrate k_{gr} im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Daten von [Harr59, Harr61] zu den Ergebnissen der Aluminiumlegierung EN AW-6060 nur minimal abweicht. Aufgrund der in dieser Untersuchung geringen Anzahl an Datenpunkten und der Streuung der einzelnen Punkte, muss anhand von weiteren Versuchsreihen und weiteren Werkstoffen geklärt werden, ob die Wachstumsrate eventuell ebenfalls eine Konstante sein könnte und ähnlich dem E-Modul für bestimmte Werkstoffgruppen etabliert werden kann.



Literaturverzeichnis

- [Aden02] ADENSTEDT, R.: *Streuung der Schwingfestigkeit*, Technische Universität Clausthal, Diss., 2002
- [Alte94] ALTENPOHL, D.: *Aluminium von innen: Das Profil eines modernen Metalles*. 5. Düsseldorf : Aluminium-Verlag, 1994
- [Bach14] BACH, J. ; HÖPPEL, H.W ; PRELL, M. ; GÖKEN, M.: Crack initiation mechanisms in AA6082 fatigued in the VHCF-regime. In: *International Journal of Fatigue* 60 (2014), S. 23–27
- [Barg05] BARGEL, H.-J (Hrsg.) ; SCHULZE, G. (Hrsg.): *Werkstoffkunde: Mit 85 Tabellen*. 9. Berlin and Heidelberg and New York : Springer, 2005 (VDI)
- [Basq10] BASQUIN, O.H.: The Exponential Law of Endurance Tests. In: *ASTM Proceedings* 10 (1910), Nr. 3, S. 625–630
- [Bath99] BATHIAS, C.: There is no infinite fatigue life in metallic materials. In: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures* 22 (1999), Nr. 7, S. 559–565
- [Bath04a] BATHIAS, C.: Piezo-electric Fatigue Testing Machines and Devices. In: SAKAI, T. (Hrsg.) ; OCHI, Y. (Hrsg.): *Proceedings of the Third International Conference on Very High Cycle Fatigue*, 2004, S. 472–483
- [Bath04b] BATHIAS, C. ; PARIS, P.C: *Giga Fatigue in Mechanical Practice*. New York : Marcel Decker, 2004
- [Bath06] BATHIAS, C.: Piezoelectric fatigue testing machines and devices. In: *International Journal of Fatigue* 28 (2006), Nr. 11, S. 1438–1445
- [Bath10] BATHIAS, Claude: Influence of the metallurgical instability on the gigacycle fatigue regime. In: *International Journal of Fatigue* 32 (2010), Nr. 3, S. 535–540
- [Baue13] BAUER, K. ; YU, L.: *FAT-Schriftenreihe*. Bd. 254: *Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen für korrosiv beanspruchte Fahrwerksbauteile unter zyklischer Belastung*. Hannover and Berlin : Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek and VDA, 2013
- [Baut41] BAUTZ, W.: Kritik der Dauerfestigkeit als Bemessungsgrundlage. In: *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A* 12 (1941), Nr. 4, S. 162–166
- [Berg07] BERGER, C. ; PYTTEL, B. ; SCHWERDT, D.: Ermüdungsschädigung im Übergang zwischen High Cycle Fatigue (HCF) und Very High Cycle Fatigue (VHCF). In: POHL, Michael (Hrsg.): *Konstruktion, Qualitätssicherung und Schadensanalyse*. Düsseldorf : Verl. Stahleisen, 2007, S. 1–13

-
- [Berg08] BERGER, C. ; PYTTEL, B. ; SCHWERDT, D.: Beyond HCF - Is there a fatigue limit? In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 39 (2008), Nr. 10, S. 769–776
- [Blec04] BLECK, W. ; MÜNSTERMANN, S.: *Einflussgrößen auf den Elastizitätsmodul von Stählen für den Fahrzeugbau: Abschlussbericht A188 (S24/10029/2001)*. Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V., 2004
- [Boll87] BOLLER, Chr. ; SEEGER, T.: *Materials science monographs*. Bd. 42A-42E: *Materials data for cyclic loading*. Amsterdam and New York : Elsevier, 1987
- [Boma85] BOMAS, H. ; MAYR, P.: Einfluß der Wärmebehandlung auf die Schwingfestigkeitseigenschaften der Legierung AlMgSi 0,7. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 16 (1985), Nr. 3, S. 88–94
- [Brad69] BRADSHAW, F.J ; WHEELER, C.: The influence of gaseous environment and fatigue frequency on the growth of fatigue cracks in some aluminum alloys. In: *International Journal of Fracture Mechanics* 5 (1969), Nr. 4
- [Buxb86] BUXBAUM, O.: *Betriebsfestigkeit: Sichere u. wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile*. Düsseldorf : Verlag Stahleisen, 1986
- [Coff43] COFFIN, L.A.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. In: *Trans. ASME* (1943), Nr. 76, S. 931–950
- [Dilt06] DILTHEY, Ulrich: *Schweisstechnische Fertigungsverfahren*. 3. Berlin and Heidelberg : Springer, 2006 (VDI)
- [DIN.09] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2009)*; . 2009-12. Berlin, 2009
- [DIN.16] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 50100:2016-12 – Schwingfestigkeitsversuch – Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile*. Berlin, Dezember 2016
- [Drei11] DREISIG, H. ; HOLZWEISSIG, F.: *Maschinendynamik*. Berlin and Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2011
- [Dubb07] DUBBEL, Heinrich ; FELDHUSEN, Jörg ; GROTE, Karl-Heinrich: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Berlin and Heidelberg : Springer, 2007
- [Edwa98] EDWARDS, G.A ; STILLER, K. ; DUNLOP, G.L ; COUPER, M.J: The precipitation sequence in Al–Mg–Si alloys. In: *Acta Materialia* 46 (1998), Nr. 11, S. 3893–3904
- [Endo69] ENDO, T. ; MORROW, J.: Cyclic stress-strain and fatigue behavior of representative aircraft metals. In: *Journal of Materials* 1 (1969), Nr. 4, S. 159–175
- [Enge10] ENGEL, Joachim: *Anwendungsorientierte Mathematik: von Daten zur Funktion: Eine Einführung in die mathematische Modellbildung für Lehramtsstudierende*. Berlin and Heidelberg : Springer, 2010

-
- [Engl07] ENGLER-PINTO JR., C.C ; FRISCH SR, R.J ; LASECKI, J.V ; MAYER, H. ; ALLISON, J. E.: Effect of frequency and environment on high cycle fatigue of cast aluminum alloys. In: ALLISON, J. E. (Hrsg.): *Fourth International Conference on Very High Cycle Fatigue*. Warrendale and Pa : TMS, 2007, S. 421–429
- [Fate05] FATEMI, A. ; PLASEIED, A. ; KHOSROVNEH, A. ; TANNER, D.: Application of bi-linear log–log S–N model to strain-controlled fatigue data of aluminum alloys and its effect on life predictions. In: *International Journal of Fatigue* 27 (2005), Nr. 9, S. 1040–1050
- [Fisc11] FISCHER, C. ; WAGENER, R. ; FRIEDMANN, A. ; AXT, C. ; MATTHIAS, M. ; MELZ, T. ; KAUFMANN, H.: Piezoelectric driven testing facilities to research the very high cycle fatigue regime. In: BERGER, C. (Hrsg.) ; CHRIST, H.-J. (Hrsg.): *Proceedings of the Fifth International Conference on Very High Cycle Fatigue*, 2011, S. 427–432
- [Fisc12] FISCHER, C. ; WAGENER, R. ; FRIEDMANN, A. ; AXT, C. ; MATTHIAS, M. ; MELZ, T. ; KAUFMANN, H.: Piezoelectric driven testing facilities to research the very high cycle fatigue regime. In: *MP Materials Testing* 54 (2012), Nr. 11-12, S. 746–749
- [Fisc13] FISCHER, C. ; BRUDER, E. ; WAGENER, R. ; MÜLLER, C. ; HANSELKA, H. ; MELZ, T.: Frequenzeinfluss auf das Ermüdungsverhalten der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 im VHCF-Bereich. In: CHRIST, H.-J. (Hrsg.): *DGM Tagung Werkstoffprüfung 2013 Neu-Ulm*, 2013, S. 115–120
- [Fisc14a] FISCHER, C. ; BRUDER, E. ; WAGENER, R. ; MÜLLER, C. ; MELZ, T.: Investigation of the influence of test frequency and heat treatment on the fatigue life of EN AW-6060 in the VHCF-regime. In: WANG, Q.Y. (Hrsg.) ; HONG, Y.S. (Hrsg.): *Proceedings of the 6th International Conference on Very High Cycle Fatigue*, 2014
- [Fisc14b] FISCHER, C. ; WAGENER, R. ; MELZ, T. ; KAUFMANN, H.: Piezo Based Testing Facilities to Discover New Areas in Material Characterisation. In: *Proceedings of the International Conference on Automotive Materials & Manufacturing 2014, Pune, Indien* (2014)
- [FKM12] RENNERT, R. ; KULLIG, E. ; VORMWALD, M. ; ESDERTS, A. ; SIEGLE, D.: *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile*. 6. Auflage. Frankfurt am Main : VDMA-Verlag, 2012 (FKM-Richtlinie)
- [Fors63] FORSYTH, P.J.E.: Fatigue damage and crack growth in aluminium alloys. In: *Acta Metallurgica* 11 (1963), S. 703–715
- [Gass41] GASSNER, E. ; PRIES, H.: Zeit- und Dauerfestigkeitsschaubilder für stabartige Bauteile aus Cr-Mo-Stahl, Duraluminium, Hydronaluminium und Elektron. In: *Luftwissen* 8 (1941), Nr. 3, S. 1–4
- [Grad14] SPRIESTERSBACH, D. ; GRAD, P. ; KERSCHER, E.: Influence of different non-metallic inclusion types on the crack initiation in high-strength steels in the {VHCF} regime. In: *International Journal of Fatigue* 64 (2014), Nr. 0, S. 114 – 120
- [Haib02] HAIBACH, Erwin: *Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung*. 2. Berlin, Heidelberg : Springer, 2002

-
- [Harr59] HARRIS, W.J.: Cyclic Stressing Frequency Effect on Fatigue Strength: A Study of Frequency Effect with Particular Reference to the Fatigue Strength of Certain Aluminium Alloys. In: *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 31 (1959), Nr. 12, S. 352–357
- [Harr61] HARRIS, W.J.: *Metallic-Fatigue*. Pergamon Press, London, 1961
- [Hess91] HESSE, B. ; SONNE, H.-M ; ROBILLER, G.: Zuverlässige Dehngrenzen im rechnergesteuerten Zugversuch ermitteln: Ein Verfahren zur Neigungsbestimmung der Hoocheschen Geraden. In: *Materialprüfung* 33 (1991), Nr. 7-8, S. 208–211
- [Hess12] HESSE, Werner: *Aluminium Schlüssel: = Key to aluminium alloys*. 10. Berlin and Wien and Zürich : Beuth, 2012 (Wissen : Werkstoffe)
- [Holp04] HOLPER, B. ; MAYER, H. ; VASUDEVAN, A.K ; STANZL-TSCHEGG, S.E: Near threshold fatigue crack growth at positive load ratio in aluminium alloys at low and ultrasonic frequency: influences of strain rate, slip behaviour and air humidity. In: *International Journal of Fatigue* 26 (2004), Nr. 1, S. 27–38
- [Hopp95] HOPPERSTAD, O.S ; LANGSETH, M. ; REMSETH, S.: Cyclic stress-strain behaviour of alloy AA6060, part I: Uniaxial experiments and modelling. In: *International Journal of Plasticity* 11 (1995), Nr. 6, S. 725–739
- [Jano57] JANOSCHEK, A.: Das reaktionskinetische Grundgesetz und seine Beziehungen zum Wachstums- und Ertragsgesetz. In: *Statistische Vierteljahresschrift* 10 (1957), S. 25–37
- [Kamm02] KAMMER, C.: *Aluminium Taschenbuch 1 – Grundlagen und Werkstoffe*. 16. Düsseldorf : Aluminium Verlag, 2002
- [Klee73] KLEE, S.: *Das zyklische Spannungs-Dehnungs- und Bruchverhalten verschiedener Stähle*. Inst. f. Statik u. Stahlbau d. Techn. Hochschule Darmstadt, 1973 (Institut für Statik und Stahlbau Darmstadt: Veröffentlichungen des Instituts für Statik und Stahlbau der Technischen Hochschule Darmstadt)
- [Köhl10] KÖHLER, M. ; JENNE, S. ; PÖTTER, K. ; ZENNER, H.: *Zählverfahren in der Betriebsfestigkeit*. 1. Berlin : Springer Berlin, 2010
- [Kost11] KOSTER, M.: *Werkstoffkundliche Berichte*. Bd. 25: *Ultraschallermüdung des Radstahls R7 im Very-High-Cycle-Fatigue (VHCF)-Bereich*. Kaiserslautern : Techn. Univ., Lehrstuhl für Werkstoffkunde, 2011
- [Lair82] LAIRD, C. ; CHARSLEY, P: Strain rate sensitivity effects in cyclic deformation and fatigue fracture. In: WELLS, J.M. (Hrsg.) ; BUCK, O. (Hrsg.) ; ROTH, L.D. (Hrsg.) ; TIEN, J.K. (Hrsg.): *Ultrasonic Fatigue*, The Metall. Soc. of AIME, 1982, S. 187–205
- [Lanz14] LANZ, C. ; WAGENER, R. ; MELZ, T.: FasTest – Fatigue Related Application Specific Testing Solutions. In: BAUMGARTNER, J. (Hrsg.) ; MELZ, T. (Hrsg.): *Proceedings of the 4th Symposium on Structural Durability in Darmstadt SoSDiD*. Stuttgart : Fraunhofer Verlag, 2014

-
- [LBF 79] FRANZ, J. ; BAUER, H.: *Zum Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Schwingfestigkeit von Nietverbindungen*. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, 1979 (Technische Mitteilungen; 85)
- [Mans65] MANSON, S.S.: Fatigue: A complex Subject - Some simple Approximations. In: *Experimental Mechanics* 5 (1965), Nr. 7, S. 193–226
- [Mans06] MANSON, S.S. ; HALFORD, G.R.: *Fatigue and Durability of Structural Materials*. ASM International, 2006
- [Mauc99] MAUCH, H.: *Statistische Methoden zur Beurteilung von Bauteillebensdauer und Zuverlässigkeit und ihre beispielhafte Anwendung auf Zahnräder : FVA-Heft 591, Forschungsvorhaben 304*. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt, 1999 (Forschungsvereinigung Antriebstechnik Heft; 591)
- [Maye99] MAYER, H.: Fatigue crack growth and threshold measurements at very high frequencies. In: *International Materials Reviews* 44 (1999), Nr. 1, S. 1–34
- [Maye01] MAYER, H. ; PAPAKYRIACOU, M. ; PIPPAN, R. ; STANZL-TSCHEGG, S.: Influence of loading frequency on the high cycle fatigue properties of AlZnMgCu1.5 aluminium alloy. In: *Materials Science and Engineering: A* 314 (2001), Nr. 1-2, S. 48–54
- [Maye06] MAYER, H.: Ultrasonic torsion and tension–compression fatigue testing: Measuring principles and investigations on 2024-T351 aluminium alloy. In: *International Journal of Fatigue* 28 (2006), Nr. 11, S. 1446–1455
- [Melz02] MELZ, Tobias: *Entwicklung und Qualifikation modularer Satellitensysteme zur adaptiven Vibrationskompensation an mechanischen Kryokühlern*, TU Darmstadt, Diss., April 2002
- [Muel11] MÜLLER-BOLLENHAGEN, Carsten: *Siegener werkstoffkundliche Berichte*. Bd. 3: *Verformungsinduzierte Martensitbildung bei mehrstufiger Umformung und deren Nutzung zur Optimierung der HCF- und VHCF-Eigenschaften von austenitischem Edelstahlblech*. Als Ms. gedr. Siegen : Univ, 2011
- [Mugh84] MUGHRABI, H.: Dislocations in Fatigue. In: *Dislocations and Properties of Real Materials (Conf. Proc.)*. London : The Institute of Metals, Book No. 323, 1984, S. 244
- [Mugh06] MUGHRABI, Hael: Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime. In: *International Journal of Fatigue* 28 (2006), Nr. 11, S. 1501 – 1508. – Third International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF-3) Third International Conference on Very High Cycle Fatigue
- [Mugh10] MUGHRABI, Hael: Fatigue, an everlasting materials problem - still en vogue. In: *Procedia Engineering* 2 (2010), Nr. 1, S. 3–26
- [Mugh13] MUGHRABI, H.: Damage Mechanisms and Fatigue Lives: From the Low to the Very High Cycle Regime. In: *Procedia Engineering* 55 (2013), S. 636–644
- [Müll15] MÜLLER, C.: *Zur statistischen Auswertung experimenteller Wöhlerlinien*. Clausthal-Zellerfeld : Universitätsbibliothek Clausthal, 2015. – ISBN 978–3–945086–68–1

-
- [Munz71] MUNZ, D. ; SCHWALBE, K. ; MAYR, P.: *Werkstoffkunde*. Bd. 3: *Dauerschwingverhalten metallischer Werkstoffe*. Braunschweig : Vieweg, 1971
- [Mura98] MURAYAMA, M. ; HONO, K. ; SAGA, M. ; KIKUCHI, M.: Atom probe studies on the early stages of precipitation in Al–Mg–Si alloys. In: *Materials Science and Engineering: A* 250 (1998), Nr. 1, S. 127–132
- [Mura12] MURAKAMI, Y.: Material defects as the basis of fatigue design. In: *International Journal of Fatigue* 41 (2012), S. 2–10
- [Natu30] JENKIN, G.F. ; LEHMANN, G.D.: High Frequency Fatigue. In: *Nature* 125 (1930), Nr. 3155, S. 617
- [Niel74] NIELSEN, H. ; HUFNAGEL, W. ; GANOULIS, G.: *Aluminium-Taschenbuch*. 13. [S.l.] : Aluminium, 1974
- [Oste07] OSTERMANN, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium*. 2. Berlin [u.a.] : Springer, 2007 (VDI-Buch)
- [Pytt11] PYTTEL, B. ; SCHWERDT, D. ; BERGER, C.: Very high cycle fatigue – Is there a fatigue limit? In: *International Journal of Fatigue* 33 (2011), Nr. 1, S. 49–58
- [Rada07] RADAJ, Dieter ; VORMWALD, Michael: *Ermüdungsfestigkeit: Grundlagen für Ingenieure*. 3. Berlin [u.a.] : Springer, 2007
- [Ramb43] RAMBERG, W. ; OSGOOD, W.R.: Description of stress-strain curves by three parameters. In: *Technical Report Technical Note No. 902, NACA* (1943)
- [Saga96] SAGA, M. ; SASAKI, Y. ; KIKUCHI, M. ; YAN, Z. ; MATSUO, M.: Effect of Pre-Aging Temperature on the Behavior in the Early Stage of Aging at High Temperature for Al-Mg-Si Alloy. In: *Materials Science Forum* 217-222 (1996), S. 821–826
- [Saka02] SAKAI, T. ; SATO, Y. ; OGUMA, N.: Characteristic S–N properties of high-carbon–chromium-bearing steel under axial loading in long-life fatigue. In: *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 25 (2002), Nr. 8-9, S. 765–773
- [Sand77] SANDERS JR., T.H. ; MAUNEY, D.A. ; STALEY, J.T.: Strain Control Fatigue as a Tool to Interpret Fatigue Initiation of Aluminum Alloys. In: JAFFEE, R.I. (Hrsg.) ; WILCOX, B.A. (Hrsg.): *Fundamental Aspects of Structural Alloy Design* Bd. 31. Springer US, 1977, S. 487–519
- [Scha03] SCHAT, Werner: *Werkstoffwissenschaft*. 9. Weinheim : Wiley-VCH, 2003
- [Schl11] SCHLICKE, Lukas: *Wärmebehandlung von Aluminium AA6060 und Entwicklung eines Polierverfahrens zur Probenpräparation für VHCF-Ermüdungsexperimente*, Technische Universität Darmstadt, Diplomarbeit, 2011
- [Schn14] SCHNEIDER, N.: *Berichte aus der Werkstofftechnik*. Bd. 2014,3: *Ermüdungsfestigkeit bei sehr hohen Schwingungszahlen unter Berücksichtigung des Einflusses der Prüffrequenz*. 1. Herzogenrath : Shaker, 2014

-
- [Schw07] SCHWERDT, D. ; PYTTEL, B. ; BERGER, C.: Ermüdungsverhalten von zwei Aluminiumknetlegierungen und Aluminiumschrauben bei sehr hohen Schwingspielzahlen. In: POHL, Michael (Hrsg.): *Konstruktion, Qualitätssicherung und Schadensanalyse*. Düsseldorf : Verl. Stahleisen, 2007, S. 399–405
- [Schw11] SCHWERDT, D.: *Schwingfestigkeit und Schädigungsmechanismen der Aluminiumlegierungen EN AW-6056 und EN AW-6082 sowie des Vergütungsstahls 42CrMo4 bei sehr hohen Schwingspielzahlen*. Darmstadt, Institut für Werkstoffkunde, Fachbereich Maschinenbau, TU Darmstadt, Diss., November 2011
- [Seeg96] SEEGER, T.: Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise. In: *Stahlbau-Handbuch* Bd. I, Teil B, Kapitel 12. Köln : Stahlbau-Verl.-Ges, 1996, S. 5–123
- [Sons03] SONSINO, C. M.: Versuchszeitverkürzung in der Betriebsfestigkeitsprüfung: Methoden und Kompromisse. In: *Material Testing, Hanser, München* 45 (2003), Nr. 4, S. 133–144
- [Sons05] SONSINO, C.M.: "Dauerfestigkeit" - Eine Fiktion: "Endurance limit" - A Fiction. In: *Konstruktion* 57 (2005), Nr. 4, S. 87–93
- [Sons07] SONSINO, C. M.: Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. In: *International Journal of Fatigue* 29 (2007), Nr. 12, S. 2246–2258
- [Stan01] STANZL-TSCHEGG, S.E. ; MAYER, H.: Fatigue and fatigue crack growth of aluminium alloys at very high numbers of cycles. In: *International Journal of Fatigue* 23 (2001), S. 231–237
- [Stan06] STANZL-TSCHEGG, S.E.: Fatigue crack growth and thresholds at ultrasonic frequencies. In: *International Journal of Fatigue* 28 (2006), Nr. 11, S. 1456–1464
- [Step58] STEPHENSON, N.: *A Review of the Literature on the Effect of Frequency on the Fatigue Properties of Metals and Alloys*. National Gas Turbine Establishment, Pyestock, 1958 (NGTE memorandum 320)
- [Step88] SANDERS JR., T.H. ; MAUNEY, D.A. ; STALEY, J.T.: Bi-linear log-log elastic strain-life model for A356 T6 cast aluminium alloy round-robin low cycle fatigue data. F. In: STEPHENS, R.I (Hrsg.): *Fatigue and Fracture toughness of A356-T6 cast aluminum alloy*. SAE SP-760, 1988
- [Sure84] SURESH, S. ; VASUDÉVAN, A. K. ; BRETZ, P. E.: Mechanisms of Slow Fatigue Crack Growth in High Strength Aluminum Alloys: Role of Microstructure and Environment. In: *Metallurgical Transactions A* 15 (1984), Nr. 2, S. 369–379
- [Thom56] THOMPSON, N. ; WADSWORTH, N. ; LOUAT, N.: The Origin of Fatigue Fracture in Copper. In: *Philosophical Magazine* 1 (February 1956), Nr. 2, S. 113–126
- [Wage07] WAGENER, Rainer: *Zyklisches Werkstoffverhalten bei konstanter und variabler Beanspruchungsamplitude*, Technische Universität Clausthal, Diss., 2007

-
- [Wage08] WAGENER, R. ; ESDERTS, A.: Cyclic material behaviour of aluminium wrought alloys. In: PORTELLA, P.D. (Hrsg.) ; BECK, T. (Hrsg.) ; OKAZAKI, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 6th International Conference on Low Cycle Fatigue*, 2008
- [Wage11] WAGENER, R. ; MELZ, T. ; FISCHER, C. ; MATTHIAS, M. ; KAUFMANN, H.: New experimental methods for investigating variable amplitude loading effects in HCF- und VHCF-Bereich : Neue experimentelle Methoden zur Untersuchung des Einflusses variabler zyklischer Belastungen in HCF- und VHCF-Bereich. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 42 (2011), Nr. 10, S. 5
- [Wage12] WAGENER, R. ; FISCHER, C. ; FROHM, A. ; KAUFMANN, H.: About the Challenge in Determining the Cyclic Material Behaviour of Aluminium Alloys for the Numerical Fatigue Analyses. In: WEILAND, H. (Hrsg.) ; ROLLETT, A.D. (Hrsg.) ; CASSADA, W.A. (Hrsg.): *ICAA13: 13th International Conference on Aluminum Alloys*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc, 2012, S. 471–478
- [Wei.68] WEI, R.P.: Fatigue-crack propagation in a high-strength aluminum alloy. In: *International Journal of Fracture Mechanics* 4 (1968), Nr. 2
- [Whee66] BRADSHAW, F.J. ; WHEELER, C.: The Effect of Environment on Fatigue-Crack Growth in Aluminum and Some Aluminium Alloys. In: *Applied Materials Research* 5 (1966), S. 112–120
- [Wiel75] WIELKE, B.: Zur Frequenzabhängigkeit der Ermüdung von Aluminium. In: *Zeitschrift für Materialkunde* 66 (1975), S. 513–515
- [Wong84] WONG, W.A.: Monotonic and cyclic fatigue properties of automotive aluminum alloys / SAE Technical Paper. 1984. – Forschungsbericht
- [Yama00] YAMADA, Kentarou ; SATO, Tatsuo ; KAMIO, Akihiko: Effects of Quenching Conditions on Two-Step Aging Behavior of Al-Mg-Si Alloys. In: *Materials Science Forum* 331-337 (2000), S. 669–674
- [Zhu.06] ZHU, X. ; SHYAM, A. ; JONES, J. ; MAYER, H. ; LASECKI, J. ; ALLISON, J.: Effects of microstructure and temperature on fatigue behavior of E319-T7 cast aluminum alloy in very long life cycles. In: *International Journal of Fatigue* 28 (2006), Nr. 11, S. 1566–1571
- [Zhu.07] ZHU, Xiaoxia: *Ultrasonic fatigue of E319 cast aluminum alloy in the long lifetime regime*, The University of Michigan, Diss., 2007
- [Zhu.08] ZHU, X. ; JONES, J.W. ; ALLISON, J.E: Effect of Frequency, Environment, and Temperature on Fatigue Behavior of E319 Cast-Aluminum Alloy: Small-Crack Propagation. In: *Metallurgical and Materials Transactions A* 39 (2008), Nr. 11, S. 2666–2680

A Anhang

A.1 Übersicht der Versuchszeiten bei ausgewählten Frequenzen

Tabelle A.1.: Übersicht welche Versuchszeit für das Erreichen einer bestimmten Schwingungszahl im Langzeitfestigkeitsbereich für verschiedene Frequenzen angenommen werden muss

Schwingspiele	1 Hz				5 Hz				10 Hz			
	y	d	h	min	y	d	h	min	y	d	h	min
10^6	0	11	13	46	0	2	7	33	0	1	3	46
10^7	0	115	17	46	0	23	3	33	0	11	13	46
10^8	3	62	9	46	0	231	11	33	0	115	17	46
10^9	31	259	1	46	6	124	19	33	3	62	9	46

Schwingspiele	100 Hz				1000 Hz				20 kHz			
	y	d	h	min	y	d	h	min	y	d	h	min
10^6	0	0	2	46	0	0	0	16	0	0	0	0,8
10^7	0	1	3	46	0	0	2	46	0	0	0	8
10^8	0	11	13	46	0	1	3	46	0	0	1	23
10^9	0	115	17	46	0	11	13	46	0	0	13	53

A.2 Rissausprägung Aluminiumlegierung EN AW-6060 für die Zustände T4, T6 und T7

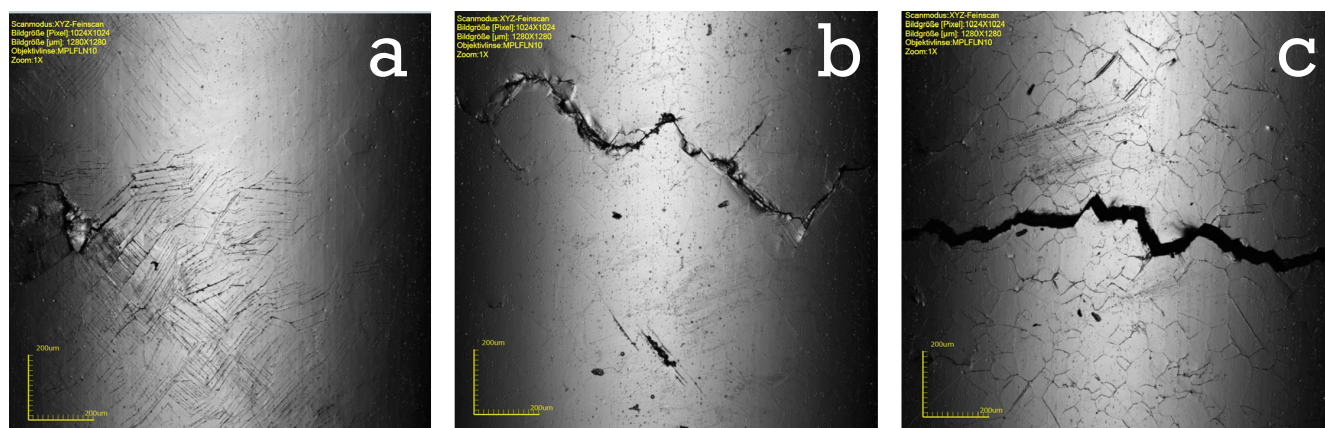


Abbildung A.1.: Konfokalmikroskopische Bilder der Rissausprägung der Aluminiumlegierung EN AW-6060 für die Zustände T4, T6 und T7 bei 700 Hz Prüffrequenz.

a: Zustand T4 ($\sigma_a = 75$ MPa, $N = 1,3 \cdot 10^8$ Schwingspiele)

b: Zustand T6 ($\sigma_a = 85$ MPa, $N = 3,6 \cdot 10^8$ Schwingspiele)

c: Zustand T7 ($\sigma_a = 75$ MPa, $N = 2,3 \cdot 10^8$ Schwingspiele)

A.3 Versuchsergebnisse Wöhlerversuche

A.3.1 Wärmebehandlungszustand T4

Tabelle A.2.: Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 mit einer Versuchsfrequenz von 140 Hz und $R = -1$

Probe	Frequenz f [Hz]	σ_a [MPa]	Schwingspiele N_A [-]
T4_R_01	140	80	119 760 768
T4_R_02	140	75	252 486 272
T4_R_03	140	85	41 971 004
T4_R_04	140	83	50 718 012
T4_R_05	140	87	25 694 352
T4_R_06	140	73	296 510 392
T4_R_07	140	70	677 369 696
T4_R_08	140	83	54 813 848
T4_R_09	140	95	2 605 492
T4_R_10	140	90	19 416 248
T4_R_11	140	105	454 816
T4_R_12	140	100	620 150
T4_R_13	140	115	84 178

Tabelle A.3.: Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 mit einer Versuchsfrequenz von 700 Hz und $R = -1$

Probe	Frequenz f [Hz]	σ_a [MPa]	Schwingspiele N_A [-]
T4_P_01	700	85	8 981 740
T4_P_02	700	75	93 410 421
T4_P_03	700	65	1 000 000 000 DL ¹
T4_P_04	700	70	736 920 933
T4_P_05	700	75	127 751 420
T4_P_06	700	80	53 306 707
T4_P_07	700	73	195 330 965
T4_P_08	700	75	127 084 856
T4_P_09	700	90	4 254 361
T4_P_10	700	82	64 190 539
T4_P_11	700	95	1 026 819
T4_P_12	700	78	83 475 053
T4_P_13	700	83	18 571 917

¹ DL = Durchläufer

Tabelle A.4.: Versuchsergebnisse der Ultraschallschwingfestigkeitsversuche EN AW-6060 im Zustand T4 mit einer Versuchsfrequenz von 20 kHz und $R = -1$

Probe	Frequenz f [Hz]	$\varepsilon_{a,t}$	σ_a [MPa]	Schwingspiele N_A [-]
T4_U_01	20000	0,107	68,57	1 939 500 000
T4_U_02	20000	0,142	91,42	4 202 200
T4_U_03	20000	0,121	77,71	285 620 000
T4_U_04	20000	0,114	73,14	1 129 000 000
T4_U_05	20000	0,128	82,28	36 970 000
T4_U_06	20000	0,124	79,54	18 290 000
T4_U_07	20000	0,118	75,88	521 900 000
T4_U_08	20000	0,124	79,54	48 120 000
T4_U_09	20000	0,121	77,71	62 070 000
T4_U_10	20000	0,118	75,88	44 180 000
T4_U_11	20000	0,135	86,85	11 830 000

A.3.2 Wärmebehandlungszustand T6

Tabelle A.5.: Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 mit einer Versuchsfrequenz von 140 Hz und $R = -1$

Probe	Frequenz f [Hz]	σ_a [MPa]	Schwingspiele N_A [-]
T6_R_01	140	85	44 869 728
T6_R_02	140	80	158 196 504
T6_R_03	140	80	134 623 904
T6_R_04	140	83	65 181 192
T6_R_05	140	85	40 754 112
T6_R_06	140	78	96 089 656
T6_R_07	140	100	3 799 733
T6_R_08	140	90	14 242 311
T6_R_09	140	85	38 982 336
T6_R_10	140	75	247 355 337
T6_R_11	140	75	266 858 728

Tabelle A.6.: Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 mit einer Versuchsfrequenz von 700 Hz und $R = -1$

Probe	Frequenz f [Hz]	σ_a [MPa]	Schwingspiele N_A [-]
T6_P_01	700	83,4	562 002 260
T6_P_02	700	96,3	80 604 080
T6_P_03	700	85	344 807 437
T6_P_04	700	90	115 207 652
T6_P_05	700	100	35 744 014
T6_P_06	700	85	356 291 547
T6_P_07	700	88	282 034 712

Tabelle A.7.: Versuchsergebnisse der Ultraschallschwingfestigkeitsversuche EN AW-6060 im Zustand T6 mit einer Versuchsfrequenz von 20 kHz und $R = -1$

Probe	Frequenz f [Hz]	$\varepsilon_{a,t}$	σ_a [MPa]	Schwingspiele N_A [-]
T6_U_01	20000	0,142	91,43	410 400 000
T6_U_02	20000	0,157	100,57	90 445 000
T6_U_03	20000	0,150	96,00	201 620 000
T6_U_04	20000	0,171	109,71	10 180 000
T6_U_05	20000	0,142	91,43	482 600 000
T6_U_06	20000	0,157	100,57	69 550 000
T6_U_07	20000	0,171	109,71	13 170 000
T6_U_08	20000	0,164	105,14	38 040 000
T6_U_09	20000	0,135	86,86	1 096 000 000

A.3.3 Wärmebehandlungszustand T7

Tabelle A.8.: Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 mit einer Versuchsfrequenz von 140 Hz und $R = -1$

Probe	Frequenz f [Hz]	σ_a [MPa]	Schwingspiele N_A [-]
T7_R_01	140	80	18 071 192
T7_R_02	140	70	150 366 832
T7_R_03	140	70	143 013 904
T7_R_04	140	65	236 166 588
T7_R_05	140	63	343 595 472
T7_R_06	140	75	21 944 716
T7_R_07	140	73	24 283 672
T7_R_08	140	60	1 000 000 000 DL ¹
T7_R_09	140	75	28 876 544
T7_R_10	140	90	751 928
T7_R_11	140	100	313 919
T7_R_12	140	85	2 926 461

¹ DL = Durchläufer

Tabelle A.9.: Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 mit einer Versuchsfrequenz von 700 Hz und $R = -1$

Probe	Frequenz f [Hz]	σ_a [MPa]	Schwingspiele N_A [-]
T7_P_01	700	86,3	6 759 036
T7_P_02	700	75	229 827 450
T7_P_03	700	85	18 916 266
T7_P_04	700	80	32 022 709
T7_P_05	700	70	615 416 038
T7_P_06	700	90	14 893 418
T7_P_07	700	95	3 773 915
T7_P_08	700	77	119 566 000
T7_P_09	700	77	112 975 529

A.3.4 Zusätzliche Wöhlerdiagramme mit Neigungen nach Sonsino und FKM

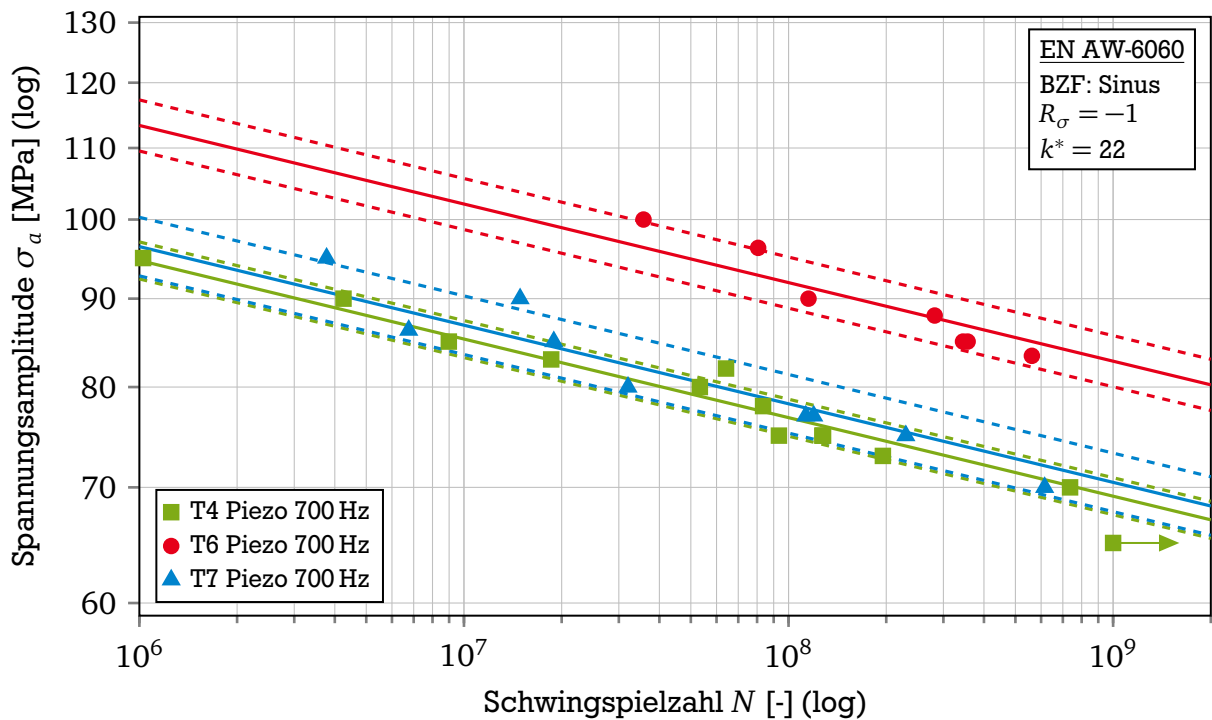


Abbildung A.2.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Piezoprüfstands bei 700 Hz mit Auswertung nach [Sons05] mit einer konstanten Neigung von $k^* = 22$

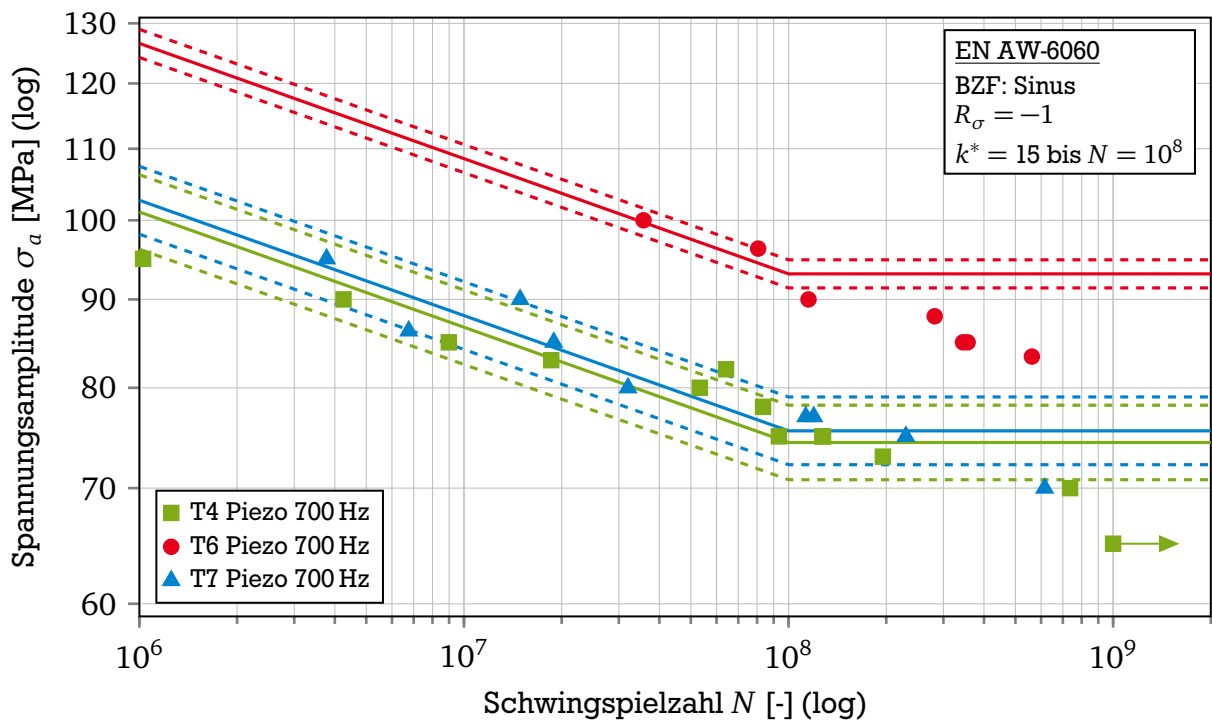


Abbildung A.3.: Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Piezoprüfstands bei 700 Hz mit Auswertung nach [FKM12] mit einer konstanten Neigung von $k^* = 15$

A.4 Auswertung des zyklischen Werkstoffverhaltens

Tabelle A.10.: Auswertungsergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 und $R = -1$

Probe	$\varepsilon_{a,t}$ [%]	$\varepsilon_{a,e}$ [%]	$\varepsilon_{a,p}$ [%]	σ_a	Schwingspiele N_A [-]
T4_D1_01	0,40	0,287	0,113	183,7	2 971
T4_D1_02	0,40	0,285	0,115	179,4	2 349
T4_D1_03	0,30	0,280	0,020	176,6	7 211
T4_D1_04	0,50	0,302	0,198	190,1	1 786
T4_D1_05	0,60	0,291	0,309	182,3	1 333
T4_D1_06	0,50	0,292	0,208	184,0	1 557
T4_D1_07	0,60	0,302	0,298	190,0	1 119
T4_D1_08	0,18	0,180	0,000	112,8	335 040
T4_D1_09	0,16	0,160	0,000	102,2	3 456 598
T4_D1_10	0,19	0,190	0,000	118,6	239 278

Tabelle A.11.: Zyklische Kennwerte für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 und $R = -1$

Nach COFFIN, MANSON, BASQUIN		Nach tri-linear	
E	64 GPa	E	64 GPa
σ'_f	428,95	σ'_{f1}	240,08
b	-0,1022	b_1	-0,0319
		σ'_{f2}	621,99
		b_2	-0,1283
		$\varepsilon_{\text{limit}}$	0,048
		b_3	-0,0546
c	-1,3987	c	-1,1747
ε'_f	173,94	ε'_f	28,4401
K'	294,21	K'	219,21
n'	0,0731	n'	0,0272

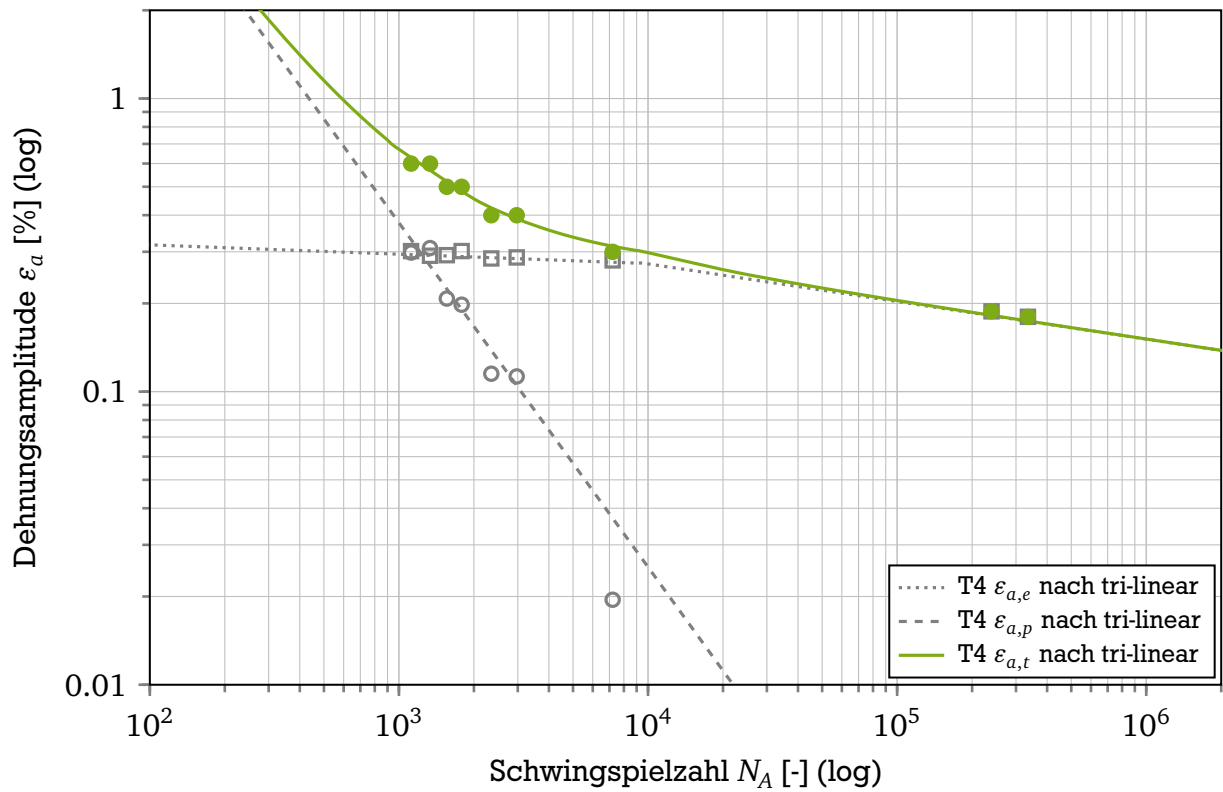


Abbildung A.4.: Dehnungswöhlerlinie nach tri-linear für den Auslagerungszustand T4

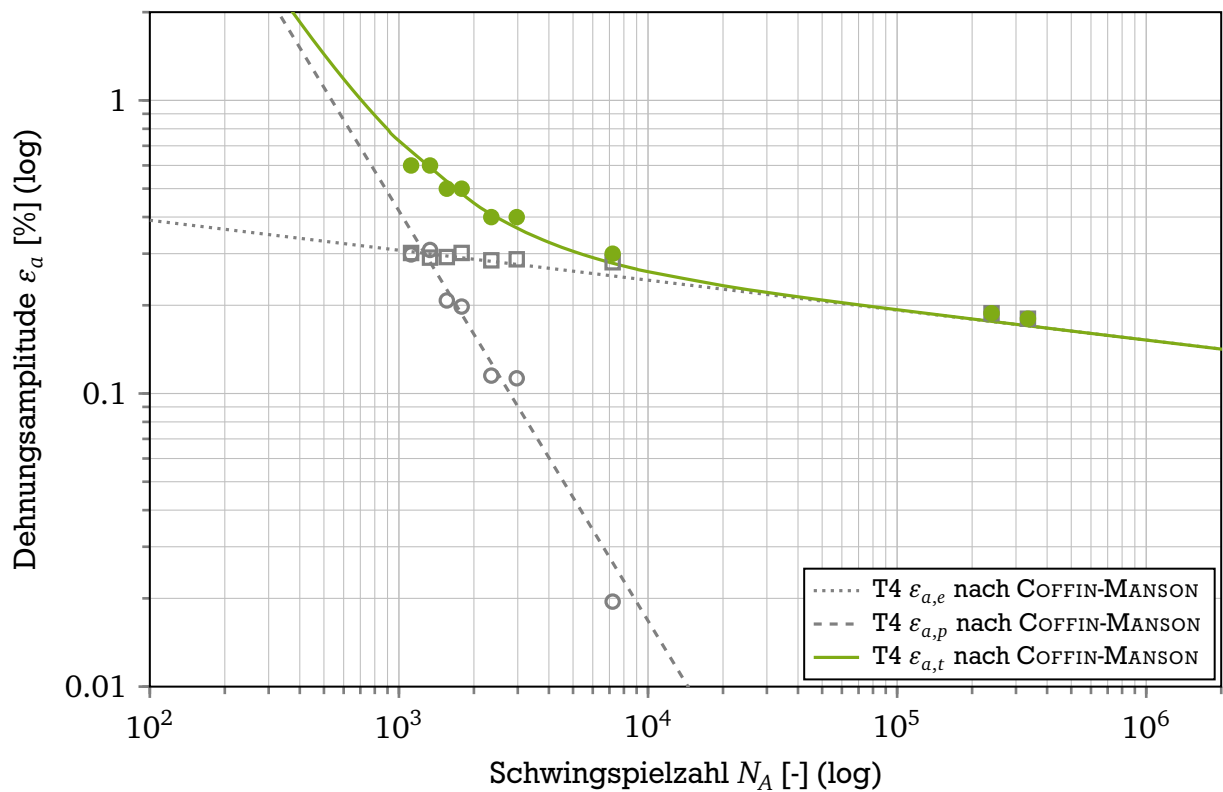


Abbildung A.5.: Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN-MANSON für den Auslagerungszustand T4

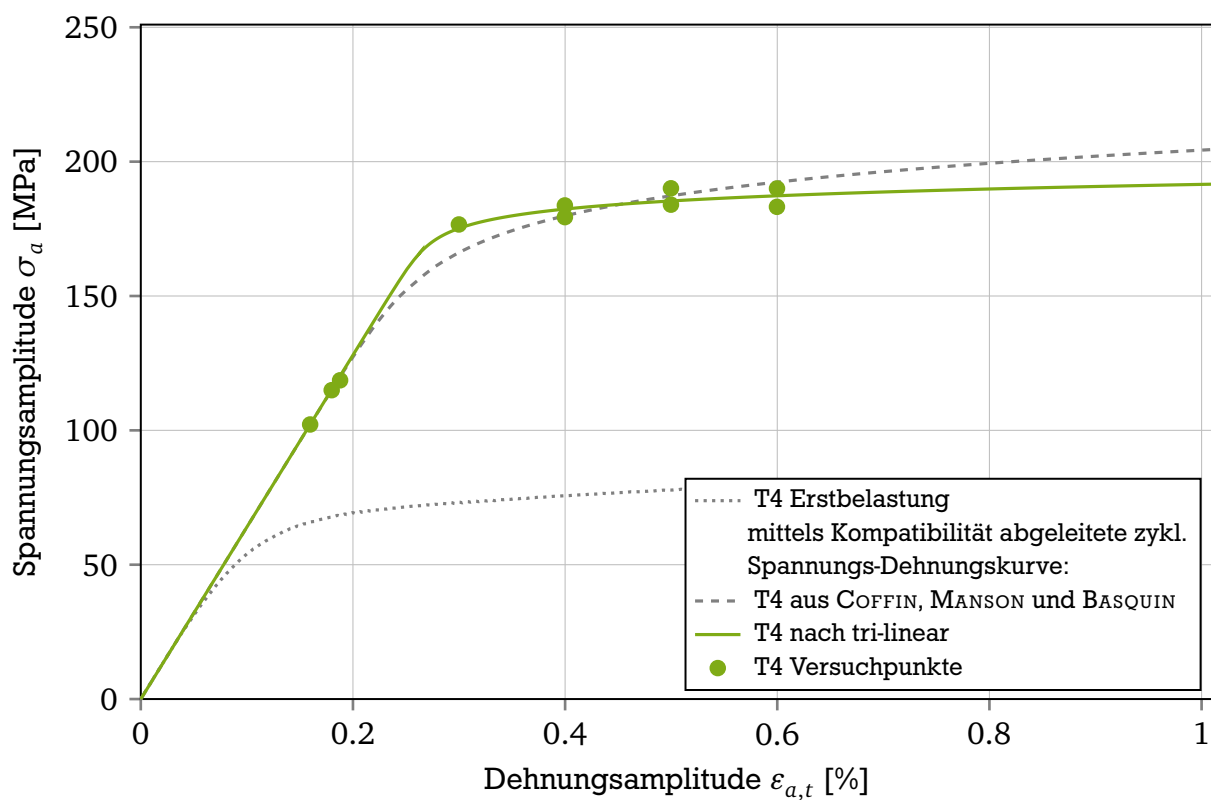


Abbildung A.6.: Zyklische Spannungs-Dehnungskurve für T4

Tabelle A.12.: Auswertungsergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 und $R = -1$

Probe	$\varepsilon_{a,t}$ [%]	$\varepsilon_{a,e}$ [%]	$\varepsilon_{a,p}$ [%]	σ_a	Schwingspiele N_A [-]
T6_D1_01	0,20	0,200	0,000	128,0	416 576
T6_D1_02	0,30	0,289	0,011	182,1	17 203
T6_D1_03	0,40	0,321	0,079	202,4	4 069
T6_D1_04	0,60	0,339	0,261	213,3	1 233
T6_D1_05	0,18	0,180	0,000	115,7	1 424 999 DL ¹
T6_D1_06	0,50	0,335	0,165	210,9	1 077
T6_D1_07	0,22	0,220	0,000	140,2	161 036
T6_D1_08	0,16	0,160	0,000	101,8	1 000 000 DL ¹
T6_D1_09	0,50	0,326	0,174	205,5	1 786

¹ DL = Durchläufer

Tabelle A.13.: Zyklische Kennwerte für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 und $R = -1$

Nach COFFIN, MANSON, BASQUIN		Nach tri-linear	
E	64 GPa	E	64 GPa
σ'_f	410,11	σ'_{f1}	322,32
b	-0,0851	b_1	-0,0539
		σ'_{f2}	610,77
		b_2	-0,1154
		$\varepsilon_{\text{limit}}$	0,192
		b_3	-0,0546
c	-0,9546	c	-0,9546
ε'_f	3,8103	ε'_f	3,8103
K'	372,01	K'	298,88
n'	0,0891	n'	0,0565

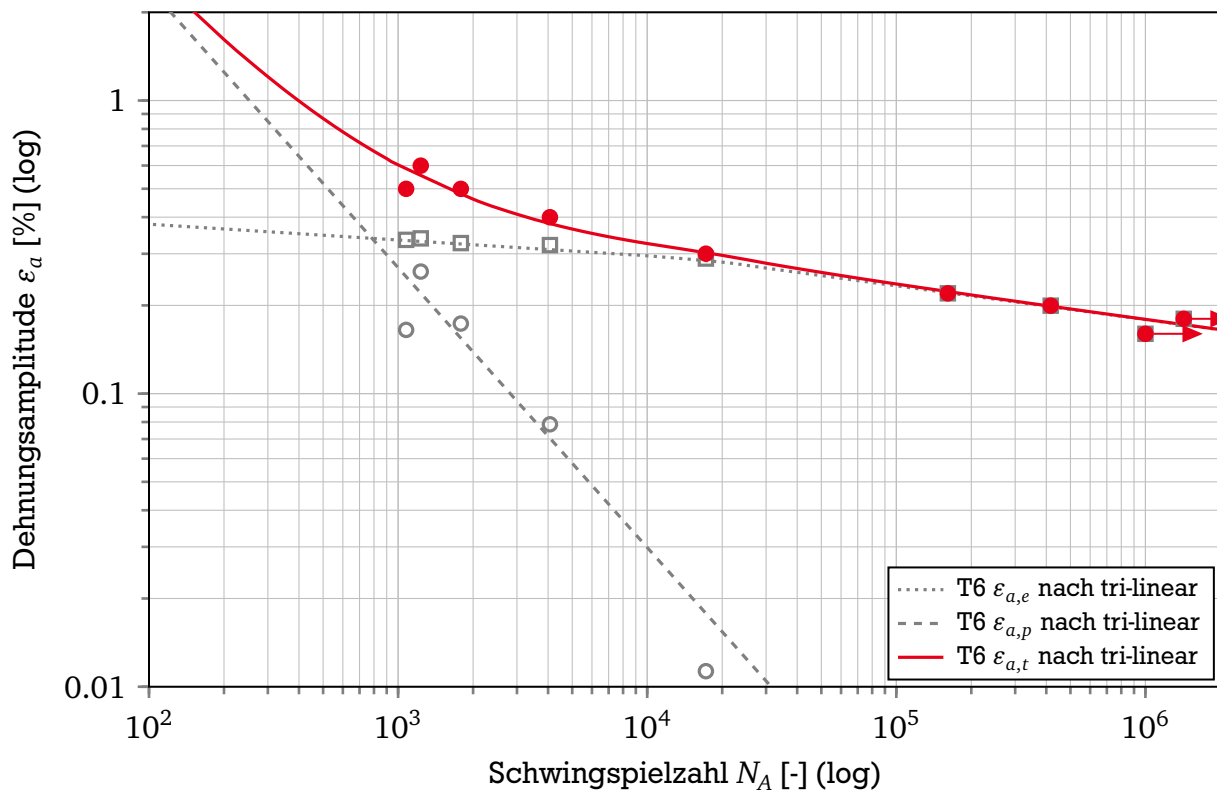


Abbildung A.7.: Dehnungswöhlerlinie nach tri-linear für den Auslagerungszustand T6

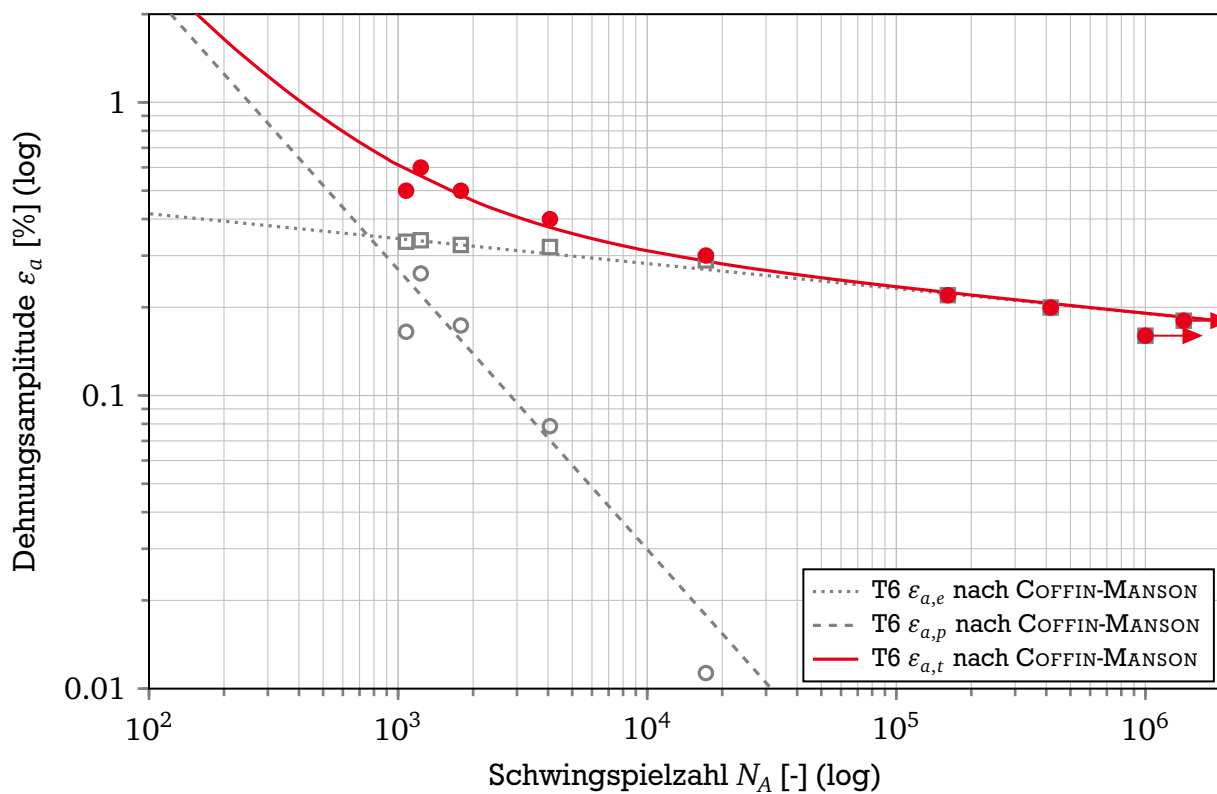


Abbildung A.8.: Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN-MANSON für den Auslagerungszustand T6

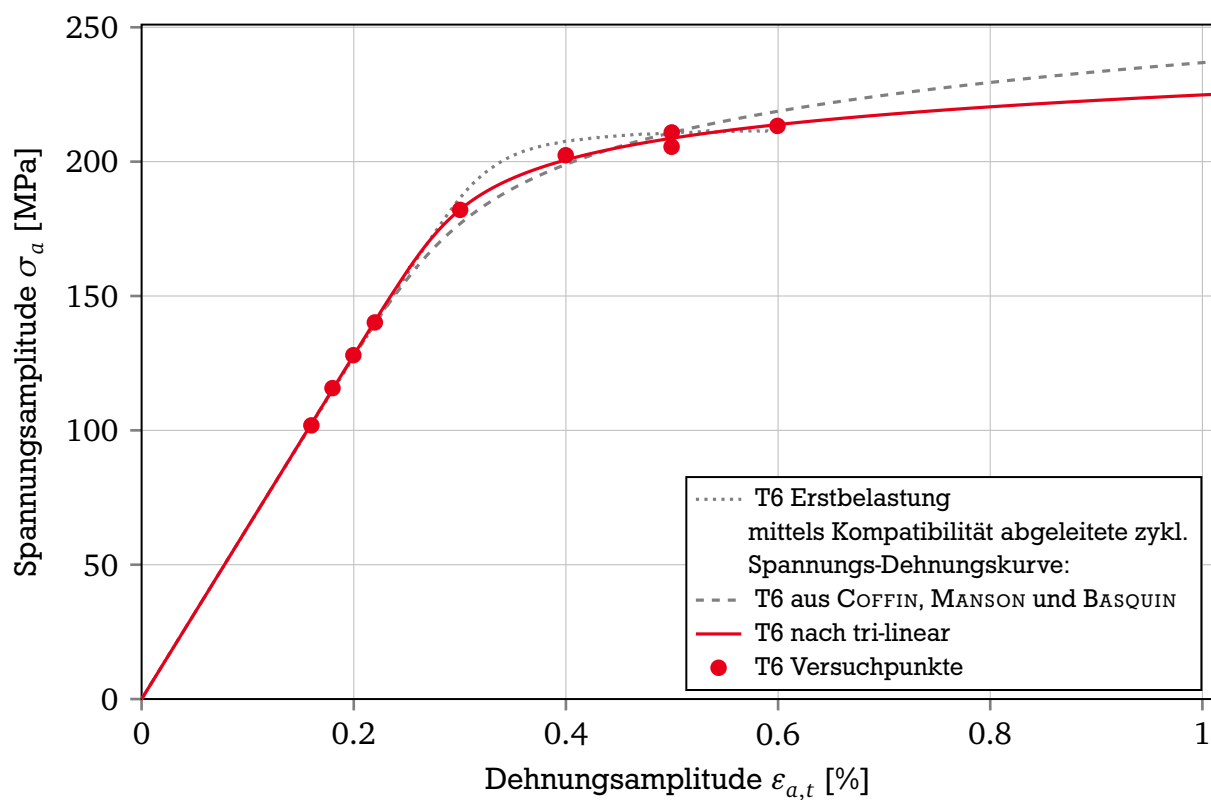


Abbildung A.9.: Zyklische Spannungs-Dehnungskurve für T6

Tabelle A.14.: Auswertungsergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 und $R = -1$

Probe	$\varepsilon_{a,t}$ [%]	$\varepsilon_{a,e}$ [%]	$\varepsilon_{a,p}$ [%]	σ_a	Schwingspiele N_A [-]
T7_D1_01	0,20	0,176	0,234	113,0	22 692
T7_D1_02	0,50	0,209	0,291	131,3	1 684
T7_D1_03	0,20	0,181	0,019	113,3	39 493
T7_D1_04	0,60	0,211	0,389	132,9	1 469
T7_D1_05	0,30	0,194	0,106	122,0	5 580
T7_D1_06	0,50	0,205	0,295	128,9	2 008
T7_D1_07	0,60	0,214	0,386	134,5	1 498
T7_D1_08	0,18	0,173	0,007	109,3	90 691
T7_D1_09	0,25	0,190	0,060	119,9	10 496
T7_D1_10	0,16	0,158	0,002	99,8	549 657

Tabelle A.15.: Zyklische Kennwerte für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 und $R = -1$

Nach COFFIN, MANSON, BASQUIN		Nach tri-linear	
E	64 GPa	E	64 GPa
σ'_f	193,50	σ'_{f1}	199,66
b	-0,0479	b_1	-0,0515
		σ'_{f2}	256,79
		b_2	-0,0662
		$\varepsilon_{\text{Limit}}$	0,109
		b_3	-0,0546
c	-0,9251	c	-0,9251
ε'_f	6,0710	ε'_f	6,0710
K'	176,25	K'	180,60
n'	0,0518	n'	0,0556

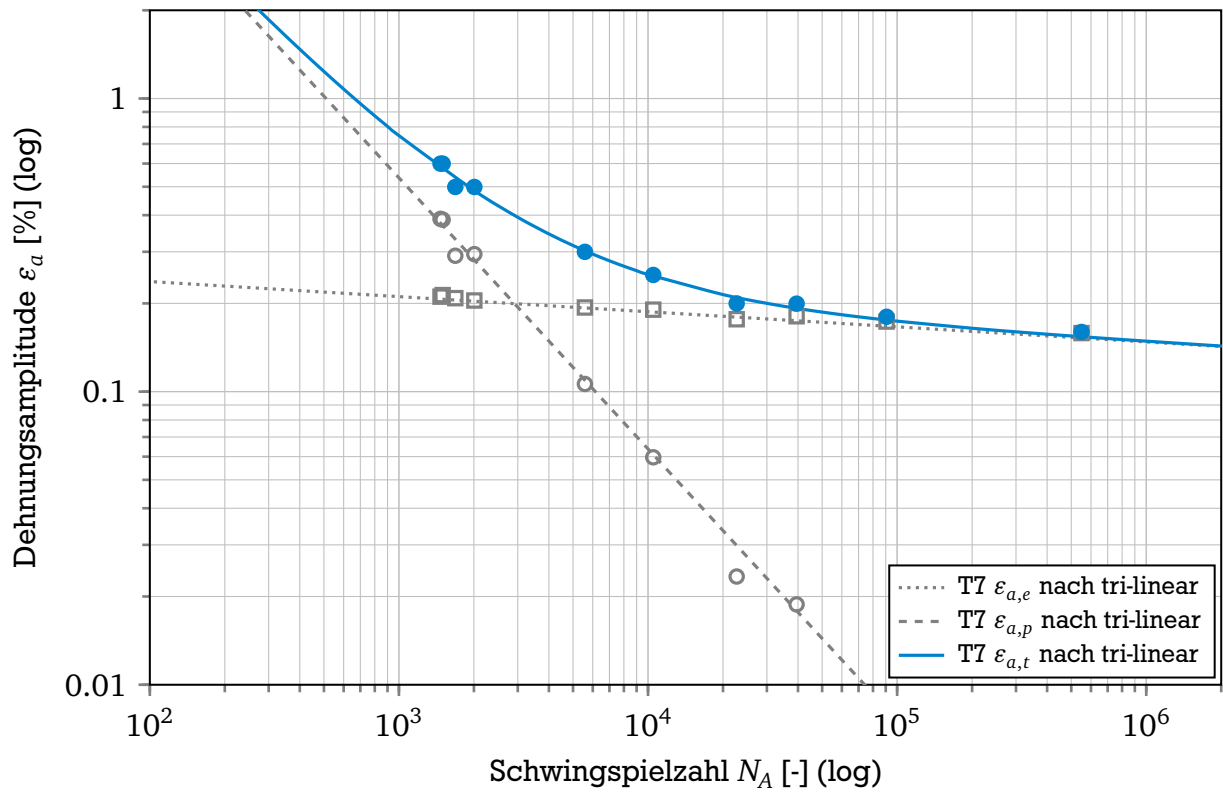


Abbildung A.10.: Dehnungswöhlerlinie nach tri-linear für den Auslagerungszustand T7

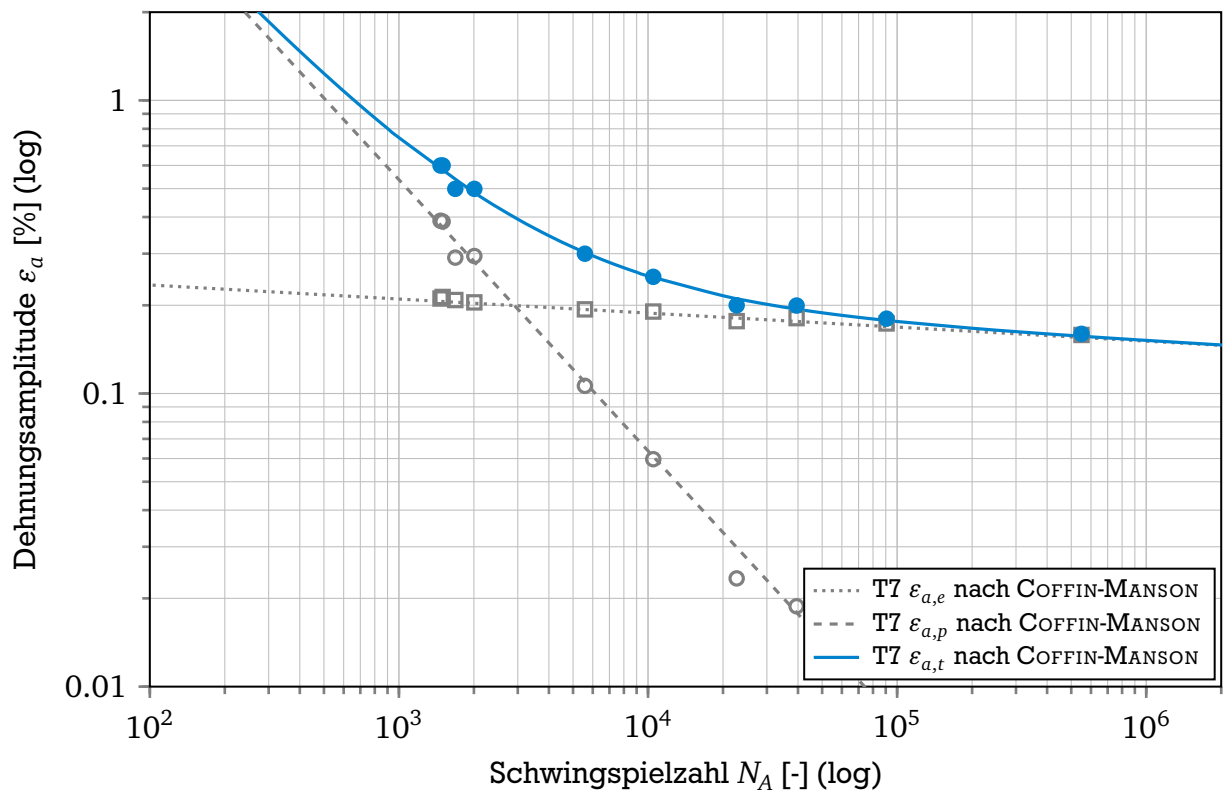


Abbildung A.11.: Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN-MANSON für den Auslagerungszustand T7

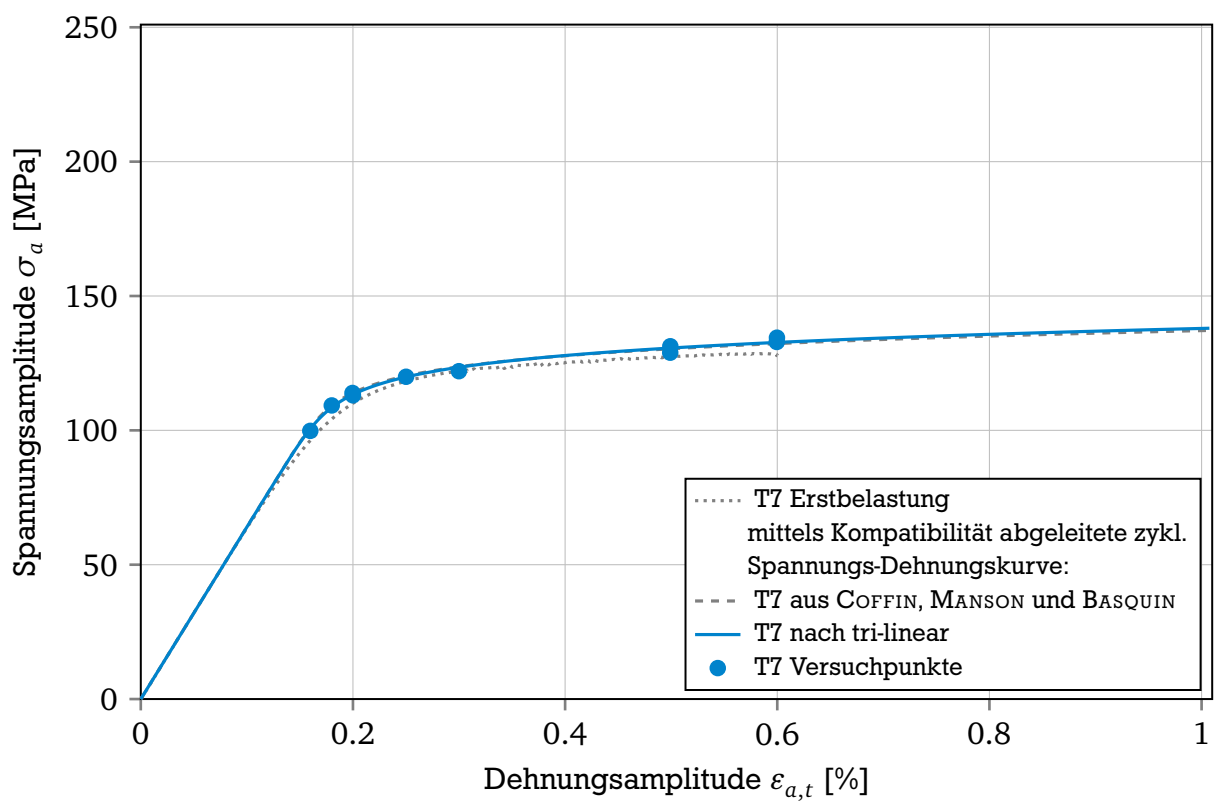


Abbildung A.12.: Zyklische Spannungs-Dehnungskurve für T7

A.5 Elastizitätsmodul

Tabelle A.16.: Quasi-statische Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4

Probe	ε_a [%]	E_{stat} [GPa]	Σ Punkte Start	Σ Punkte Ende
T4_D1_01	0,40	64,04	125	30
T4_D1_02	0,40	56,08	125	15
T4_D1_03	0,30	64,74	152	45
T4_D1_04	0,50	64,06	109	30
T4_D1_05	0,60	64,15	98	30
T4_D1_06	0,50	64,79	109	30
T4_D1_07	0,60	64,35	98	39
T4_D1_08	0,18	64,08	222	115
T4_D1_09	0,16	64,14	227	83
T4_D1_10	0,19	63,48	237	97

Tabelle A.17.: Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 aus stabilisierter Hysterese

Probe	ε_a [%]	E_{dyn} [GPa]	Σ Punkte Start	Σ Punkte Ende
T4_D1_01	0,40	63,04	76	30
T4_D1_02	0,40	63,51	75	33
T4_D1_03	0,30	64,08	75	45
T4_D1_04	0,50	63,34	65	23
T4_D1_05	0,60	59,06	63	13
T4_D1_06	0,50	63,51	66	20
T4_D1_07	0,60	63,64	63	16
T4_D1_08	0,18	64,33	77	77
T4_D1_09	0,16	64,52	68	68
T4_D1_10	0,19	63,57	102	102

Tabelle A.18.: Quasi-statische Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6

Probe	ε_a [%]	E_{stat} [GPa]	Σ Punkte Start	Σ Punkte Ende
T6_D1_01	0,20	63,66	249	249
T6_D1_02	0,30	64,65	156	156
T6_D1_03	0,40	65,07	128	128
T6_D1_04	0,60	64,16	100	100
T6_D1_05	0,18	64,82	249	249
T6_D1_06	0,50	64,42	110	110
T6_D1_07	0,22	64,83	205	205
T6_D1_08	0,16	63,97	248	248
T6_D1_09	0,50	63,89	111	111

Tabelle A.19.: Elastizitätsmodulerggebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 aus stabilisierter Hysterese

Probe	ε_a [%]	E_{dyn} [GPa]	Σ Punkte Start	Σ Punkte Ende
T6_D1_01	0,20	64,69	110	110
T6_D1_02	0,30	64,04	75	60
T6_D1_03	0,40	63,64	75	42
T6_D1_04	0,60	61,39	63	24
T6_D1_05	0,18	64,86	85	85
T6_D1_06	0,50	64,07	86	86
T6_D1_07	0,22	64,38	89	89
T6_D1_08	0,16	64,17	70	70
T6_D1_09	0,50	61,45	66	26

Tabelle A.20.: Quasi-statische Elastizitätsmodulerggebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7

Probe	ε_a [%]	E_{stat} [GPa]	Σ Punkte Start	Σ Punkte Ende
T7_D1_01	0,20	64,44	246	101
T7_D1_02	0,50	64,08	110	77
T7_D1_03	0,20	63,90	247	123
T7_D1_04	0,60	64,88	99	69
T7_D1_05	0,30	64,01	152	92
T7_D1_06	0,50	64,47	109	79
T7_D1_07	0,60	64,28	99	72
T7_D1_08	0,18	63,99	249	103
T7_D1_09	0,25	63,97	177	106
T7_D1_10	0,16	63,58	249	135

Tabelle A.21.: Elastizitätsmodulerggebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 aus stabilisierter Hysterese

Probe	ε_a [%]	E_{dyn} [GPa]	Σ Punkte Start	Σ Punkte Ende
T7_D1_01	0,20	62,97	97	56
T7_D1_02	0,50	58,95	65	25
T7_D1_03	0,20	63,18	101	58
T7_D1_04	0,60	59,23	63	22
T7_D1_05	0,30	60,85	77	38
T7_D1_06	0,50	58,58	64	23
T7_D1_07	0,60	57,98	62	20
T7_D1_08	0,18	63,48	105	74
T7_D1_09	0,25	61,77	85	49
T7_D1_10	0,16	63,69	89	80

A.6 Auswertung der Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgeregelten Versuchen

Tabelle A.22.: Auswertung der statischen und zyklischen Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgeregelten Versuchen für EN AW-6060 T4 in [MPa]

Probe	T4_D1_03	T4_D1_07	T4_D1_08	T4_D1_09	T4_D1_10
$R_{p0,01}$ [MPa]	42,5	49,8	64,7	52,8	60,4
$\bar{\sigma} R_{p0,01}$	$T_{\sigma R_{p0,01}}$	$R'_{p0,01}$	Θ'	$\varepsilon_{a,k}$	
54,0 MPa	1,53	171,0 MPa	3,17	0,171 %	

Tabelle A.23.: Auswertung der statischen und zyklischen Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgeregelten Versuchen für EN AW-6060 T6 in [MPa]

Probe	T6_D1_02	T6_D1_03	T6_D1_04	T6_D1_06	
$R_{p0,01}$ [MPa]	184,9	184,9	188,3	183,0	
$\bar{\sigma} R_{p0,01}$	$T_{\sigma R_{p0,01}}$	$R'_{p0,01}$	Θ'	$\varepsilon_{a,k}$	
185,3 MPa	1,03	178,0 MPa	0,96	0,167 %	

Tabelle A.24.: Auswertung der statischen und zyklischen Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgeregelten Versuchen für EN AW-6060 T7 in [MPa]

Probe	T7_D1_02	T7_D1_04	T7_D1_05	T7_D1_06	T7_D1_07
$R_{p0,01}$ [MPa]	93,0	92,0	94,2	98,5	96,2
$\bar{\sigma} R_{p0,01}$	$T_{\sigma R_{p0,01}}$	$R'_{p0,01}$	Θ'	$\varepsilon_{a,k}$	
94,8 MPa	1,07	109,0 MPa	1,15	0,115 %	

A.7 Tabellen zur Abschätzung der Funktion des Frequenzeinflusses

Tabelle A.25.: Punkte der Wöhlerlinie aus [Harr59, Harr61] für den Werkstoff L70 bei verschiedenen Frequenzen und Schwingspielzahlen

f	$N = 5 \cdot 10^4$	$N = 1 \cdot 10^5$	$N = 5 \cdot 10^5$	$N = 5 \cdot 10^6$	$N = 1 \cdot 10^8$
10 Hz	194 MPa	167 MPa	120 MPa	89 MPa	79 MPa
32 Hz	204 MPa	180 MPa	129 MPa	97 MPa	86 MPa
100 Hz	244 MPa	212 MPa	153 MPa	113 MPa	99 MPa
300 Hz	290 MPa	254 MPa	184 MPa	131 MPa	112 MPa
1000 Hz	370 MPa	318 MPa	224 MPa	156 MPa	132 MPa

Tabelle A.26.: Ermittlung der Parameter für die Funktion der ertragbaren Spannungsamplitude $\sigma_{a,f,N}$ in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Schwingungszahl N für die Daten von [Harr59, Harr61] mit Hilfe eines Programms zur Darstellung mathematischer Funktionen

$N = 5 \cdot 10^4$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	370	$384 \pm 13,9$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	194	$191 \pm 6,1$
k_{gr}	0,001	$0,0025 \pm 0,0005$
$N = 1 \cdot 10^5$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	318	$326 \pm 9,4$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	167	$165 \pm 4,8$
k_{gr}	0,001	$0,0028 \pm 0,0005$
$N = 5 \cdot 10^5$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	224	$227 \pm 5,2$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	120	$118 \pm 3,1$
k_{gr}	0,001	$0,0032 \pm 0,0005$
$N = 5 \cdot 10^6$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	156	$157 \pm 4,7$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	89	$89 \pm 3,0$
k_{gr}	0,001	$0,0035 \pm 0,0008$
$N = 1 \cdot 10^8$	Startwerte	Iteration
$\sigma_{a,f \rightarrow \infty, N}$ [MPa]	132	$133 \pm 4,6$
$\sigma_{a,f \rightarrow 0, N}$ [MPa]	79	$80 \pm 3,0$
k_{gr}	0,001	$0,0036 \pm 0,0009$

A.8 Diagramme und Tabellen für die Auswertung der Transienzgrenze

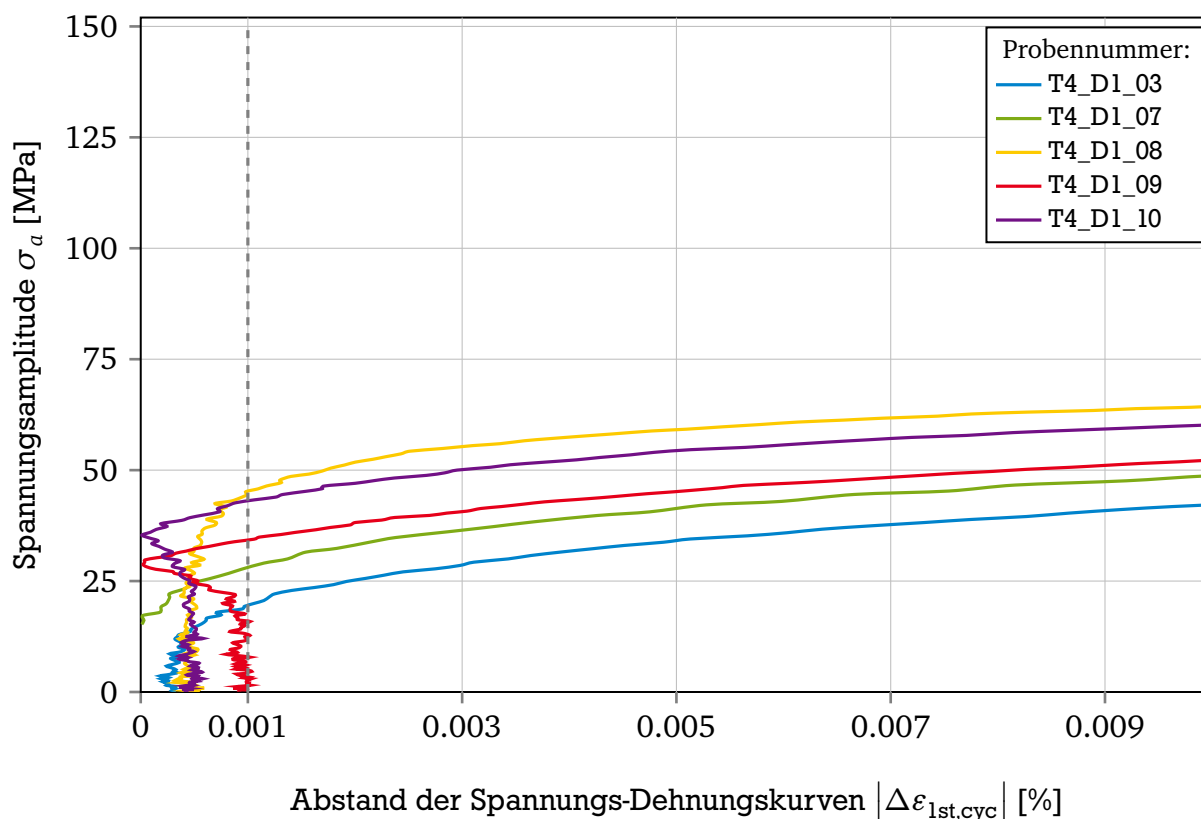


Abbildung A.13.: Abstände der zyklischen und der statischen Spannungs-Dehnungskurve $|\Delta \varepsilon_{1st,cyc}|$ für den Werkstoffzustand T4 und Darstellung der Transienzgrenze

Tabelle A.27.: Spannungsamplitude σ_{limit} im Punkt der Transienzgrenze $|\Delta \varepsilon_{1st,cyc}|$ für den Werkstoffzustand T4

Probe	ε_a [%]	σ_{limit} [MPa]	$\emptyset \sigma_{limit}$ [MPa]	$T_{\sigma_{limit}}$
T4_D1_03	0,20	19,98	34,96	2,37
T4_D1_07	0,60	29,05		
T4_D1_08	0,18	45,78		
T4_D1_09	0,25	34,92		
T4_D1_10	0,16	43,30		

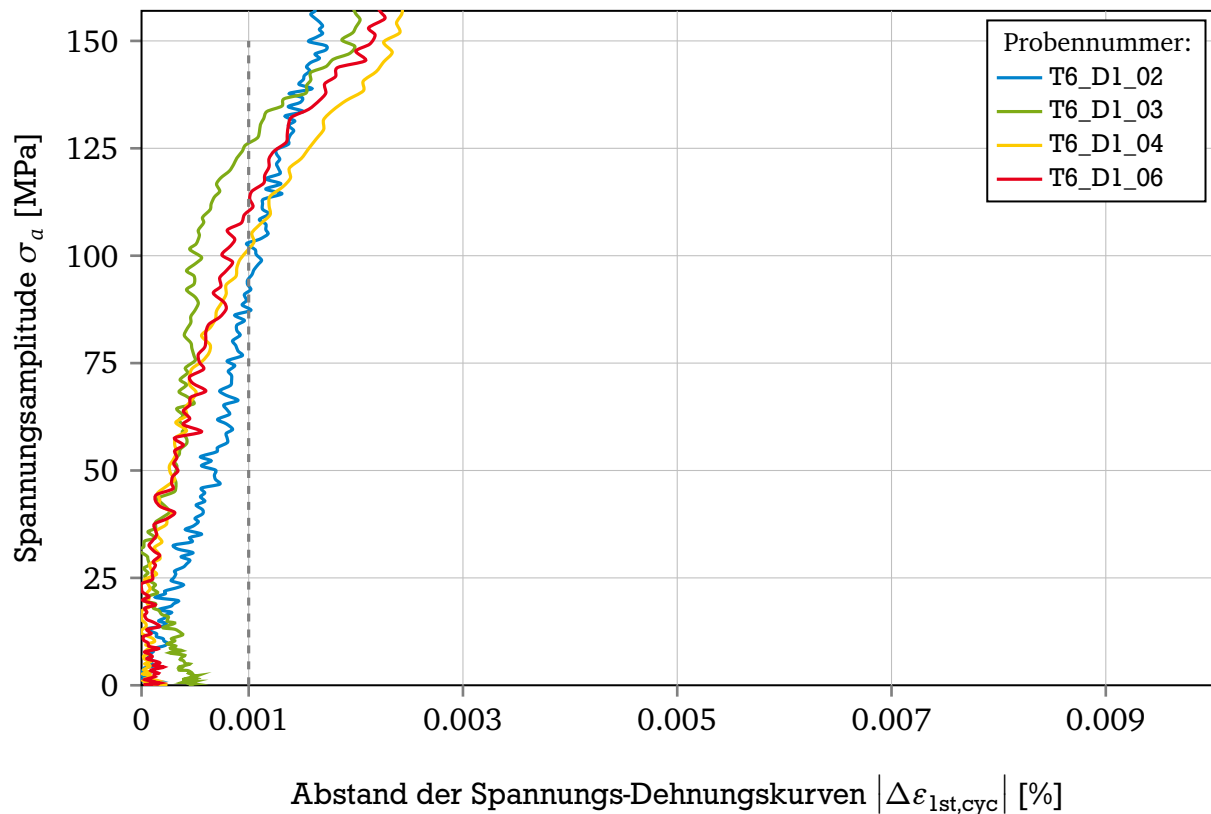


Abbildung A.14.: Abstände der zyklischen und der statischen Spannungs-Dehnungskurve $|\Delta\epsilon_{1st,cyc}|$ für den Werkstoffzustand T6 und Darstellung der Transienzzgrenze

Tabelle A.28.: Spannungsamplitude σ_{limit} im Punkt der Transienzzgrenze $|\Delta\epsilon_{1st,cyc}|$ für den Werkstoffzustand T6

Probe	ϵ_a [%]	σ_{limit} [MPa]	$\bar{\sigma}_{limit}$ [MPa]	$T_{\sigma_{limit}}$
T6_D1_02	0,30	103,81	111,45	1,29
T6_D1_03	0,40	127,39		
T6_D1_04	0,60	103,23		
T6_D1_06	0,50	111,38		

Tabelle A.29.: Spannungsamplitude σ_{limit} im Punkt der Transienzzgrenze $|\Delta\epsilon_{1st,cyc}|$ für den Werkstoffzustand T7

Probe	ϵ_a [%]	σ_{limit} [MPa]	$\bar{\sigma}_{limit}$ [MPa]	$T_{\sigma_{limit}}$
T7_D1_02	0,30	58,09	63,89	1,18
T7_D1_04	0,40	69,88		
T7_D1_05	0,60	63,28		
T7_D1_06	0,50	63,72		
T7_D1_07	0,50	64,47		

A.9 Umrechnung von Versuchsergebnissen von EN AW-6060 Zustand T6 mit Hilfe des Frequenzeinflusses

Der Frequenzeinfluss kann über die in Kapitel 6.3.5 erstellte Formel 6.4 über $\Delta f_{\text{influence}}$ herausgerechnet werden. Somit ergeben sich die in Tabelle A.30 eingetragenen und mit $\Delta f_{\text{influence}} = 0,75$ von 20 kHz auf 5 Hz umgerechneten Werte der Dehnungsamplitude.

Tabelle A.30.: Versuchsergebnisse der Ultraschallschwingfestigkeitsversuche EN AW-6060 im Zustand T6 mit einer Versuchsfrequenz von 20 kHz und $R = -1$ auf 5 Hz umgerechnet

Probe	$\varepsilon_{a,t}$	Schwingspiele N_A [-]
T6_U_01	0,107	410 400 000
T6_U_02	0,118	90 445 000
T6_U_03	0,113	201 620 000
T6_U_04	0,128	10 180 000
T6_U_05	0,107	482 600 000
T6_U_06	0,118	69 550 000
T6_U_07	0,128	13 170 000
T6_U_08	0,123	38 040 000
T6_U_09	0,101	1 096 000 000

Abbildungsverzeichnis

2.1. Varianten der Werkstoffzustände T6 und T7	5
2.2. Darstellung der Kohärenzformen von Ausscheidungen	7
2.3. Ablaufdiagramm der zeitlichen Abfolge der Umwandlungen der Kaltauslagerung	8
2.4. Ablaufdiagramm der zeitlichen Abfolge der Umwandlungen der Warmauslagerung	9
2.5. Schneiden von Ausscheidungen durch Versetzungen	10
2.6. Umgehen von Ausscheidungen nach dem OROWAN-Mechanismus	10
2.7. Kennwerte des Zugversuchs bei Aluminiumlegierungen nach [Oste07]	12
2.9. Grenzen der dauerfesten Bemessung schematisch	16
2.10. Auswahlkriterien zur Wahl des geeigneten Regelungsverfahrens	18
2.11. Wechselverformungskurven bei (a) Dehnungsregelung und (b) Spannungsregelung, vgl. [Mans06]	18
2.12. Verschieben der Versuchspunkte auf einen gemeinsamen Spannungshorizont	21
2.13. Persistente Gleitbänder auf der Oberfläche einer Aluminiumlegierung	22
2.14. Rissentstehung an der Oberfläche	23
2.15. Schematische Dehnungswöhlerlinie für Werkstoffe vom Typ I (einphasige Werkstoffe) nach [Mugh06]	24
2.16. Fisheye Rissausgang in einem hochfesten Stahl	25
2.17. Schematische Wöhlerlinie für Werkstoffe vom Typ II (hochfeste, metallische Werkstoffe) nach [Mugh06]	26
2.18. Wöhlerlinien weiterer technischer Werkstoffe	26
2.19. Anrisskriterium der dehnungsgeregelten Versuche	27
2.20. Zyklische Spannungs-Dehnungskurve und Dehnungswöhlerlinie [Haib02]	28
2.21. Aufteilung der stabilisierten Hysterese	29
2.22. Abknicken der elastischen Dehnungsanteile	30
2.23. Vergleich der Spannungs-Dehnungshysteresen	31
2.24. Schematische Darstellung der Dehnungswöhlerlinie	33
2.25. Zyklische Spannungs-Dehnungskurve für eine Aluminiumlegierung	34
2.26. Vergleich des Verlaufs der plastischen Dehnungswöhlerlinie für sieben verschiedene Werkstoffe	34
2.27. Zeitliche Abhängigkeit von Dehnung ε und Dehnrate $\dot{\varepsilon}$	36
2.28. Wöhlerlinien einer Aluminiumlegierung	38
2.29. Darstellung des Frequenzeinflusses aus Schwingfestigkeitsdaten von HARRIS [Harr59, Harr61] nach [Sons03, Rada07]	39
4.1. Schema der Temperaturverläufe zur Herstellung der unterschiedlichen Auslagerungszustände	44
4.2. Spannungs-Dehnungs-Kurven der Zugversuche	46
4.3. TEM Bilder der Mikrostruktur der Auslagerungszustände	46
4.4. Probengeometrie der spannungsgeregelten Schwingfestigkeitsversuche	47
4.5. Probengeometrie der Ultraschallschwingfestigkeitsversuche	48

4.6. Probengeometrie für die dehnungsgeregelten Versuche	48
4.7. Probenrauheit nach der Fertigung [Schl11]	49
4.8. Oberflächenstruktur einer klassisch elektropolierten Aluminiumprobe	50
4.9. Poliererergebnis nach gepulsten elektrolytischem Polieren	50
5.1. Schematischer Aufbau eines servohydraulischen Prüfstandes	52
5.2. Schematischer Aufbau des Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstandes mit Spannungs- und Wegverlauf nach [Bath04b]	55
5.3. Beispiel für einen Puls des Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstands nach [Kost11]	56
5.4. Aufbau Prüfmaschine mit Hochleistungspiezoaktuator	57
5.5. Arbeitsdiagramm eines Piezoaktuators	58
5.6. Vergleich der Schwingungsbereichsbereiche in denen die Prüfstände sinnvoll genutzt werden [Lanz14]	59
6.2. Reduzierte Punkte zur Auswertung des E-Moduls der Erstbelastungskurve	63
6.3. Reduzierte Punkte zur Auswertung des E-Moduls der stabilisierten Hysterese	63
6.4. Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und nach dem tri-linearen Konzept für den Auslagerungszustand T4	65
6.5. Vergleich Gesamtdehnungswöhlerlinie ausgewertet nach tri-linear und COFFIN, MANSON, BASQUIN für den Auslagerungszustand T4	66
6.6. Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und nach dem tri-linearen Konzept für den Auslagerungszustand T6	67
6.7. Vergleich Gesamtdehnungswöhlerlinie ausgewertet nach tri-linear und COFFIN, MANSON, BASQUIN für den Auslagerungszustand T6	68
6.8. Regressionsgeraden der elastischen Dehnungsanteile nach COFFIN, MANSON und BASQUIN und nach dem tri-linearen Konzept für den Auslagerungszustand T7	69
6.9. Vergleich Gesamtdehnungswöhlerlinie ausgewertet nach tri-linear und COFFIN, MANSON, BASQUIN für den Auslagerungszustand T7	70
6.10. Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven für EN AW-6060 T4	72
6.11. Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven für EN AW-6060 T6	72
6.12. Vergleich der Spannungs-Dehnungskurven für EN AW-6060 T7	73
6.13. Spannungs-Dehnungskurven für EN AW-6060 der Zustände T4, T6, T7	74
6.14. Vergleich von statischer ($R_{p0,01}$) und zyklischer ($R'_{p0,01}$) Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgeregelten Versuchen und der Zugfestigkeit R_m aus dem Zugversuch	74
6.15. Punkte der Versuchsergebnisse des Resonanzpulsers bei 140 Hz Versuchsfrequenz im Wöhlerdiagramm dargestellt	76
6.16. Punkte der Versuchsergebnisse des Piezoprüfstandes bei 700 Hz Versuchsfrequenz im Wöhlerdiagramm dargestellt	77
6.17. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Resonanzpulsers bei 140 Hz mit Aus- wertung nach [Sons05] mit einer konstanten Neigung von $k^* = 22$	78
6.18. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Resonanzpulsers bei 140 Hz mit Aus- wertung nach [FKM12] mit einer konstanten Neigung von $k^* = 15$	78
6.19. Normierte Wöhlerlinie	79
6.20. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Resonanzpulsers	80
6.21. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Piezoprüfstands	81

6.22. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Ultraschallschwingfestigkeitsprüfstands	82
6.23. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Auslagerungszustands T4	83
6.24. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Auslagerungszustands T6	84
6.25. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Auslagerungszustands T7	84
6.26. Vergleich der Spannungsamplituden bei 10^8 Schwingspielen	85
6.27. Darstellung des Frequenzeinflusses im Vergleich mit Daten von HARRIS	86
6.28. Darstellung des Frequenzeinflusses im Vergleich mit Daten von HARRIS [Harr59, Harr61]	87
6.29. Datenpunkte aus Daten von [Harr59, Harr61] durch Funktion 6.2 angenähert	90
6.30. Spannungsamplituden der Aluminiumlegierung ENAW-6060 T6 bei $N = 10^8$ über der linear skalierten Frequenz aufgetragen und mit Funktion 6.2 angenähert	91
6.31. Spannungsamplituden der Aluminiumlegierung ENAW-6060 T6 bei $N = 10^8$ über der logarithmisch skalierten Frequenz aufgetragen und mit Funktion 6.2 angenähert	91
6.32. Vorgehen zur Ableitung einer Spannungswöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich mit Hilfe des Frequenzeinflusses (schematisch)	93
7.1. Schematische Darstellung der Transienzgrenze $\Delta\epsilon_{0,001}$	98
7.2. Abstände der zyklischen und der statischen Spannungs-Dehnungskurve $ \Delta\epsilon_{1st,cyc} $ für den Werkstoffzustand T7 und Darstellung der Transienzgrenze	99
7.3. Dehnungswöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich für EN AW-6060 Auslagerungszustand T4	102
7.4. Dehnungswöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich für EN AW-6060 Auslagerungszustand T6	103
7.5. Dehnungswöhlerlinie vom Kurzzeitfestigkeits- bis in den Langzeitfestigkeitsbereich für EN AW-6060 Auslagerungszustand T7	104
A.1. Konfokalmikroskopische Bilder der Rissausprägung der Aluminiumlegierung EN AW-6060 für die Zustände T4, T6 und T7 bei 700 Hz Prüffrequenz	122
A.2. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Piezoprüfstands bei 700 Hz mit Auswertung nach [Sons05] mit einer konstanten Neigung von $k^* = 22$	127
A.3. Wöhlerdiagramm der Versuchsergebnisse des Piezoprüfstands bei 700 Hz mit Auswertung nach [FKM12] mit einer konstanten Neigung von $k^* = 15$	127
A.4. Dehnungswöhlerlinie nach tri-linear für den Auslagerungszustand T4	129
A.5. Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN-MANSON für den Auslagerungszustand T4	129
A.6. Zyklische Spannungs-Dehnungskurve für T4	130
A.7. Dehnungswöhlerlinie nach tri-linear für den Auslagerungszustand T6	132
A.8. Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN-MANSON für den Auslagerungszustand T6	132
A.9. Zyklische Spannungs-Dehnungskurve für T6	133
A.10. Dehnungswöhlerlinie nach tri-linear für den Auslagerungszustand T7	135
A.11. Dehnungswöhlerlinie nach COFFIN-MANSON für den Auslagerungszustand T7	135
A.12. Zyklische Spannungs-Dehnungskurve für T7	136
A.13. Abstände der zyklischen und der statischen Spannungs-Dehnungskurve $ \Delta\epsilon_{1st,cyc} $ für den Werkstoffzustand T4 und Darstellung der Transienzgrenze	142

A.14. Abstände der zyklischen und der statischen Spannungs-Dehnungskurve $ \Delta \varepsilon_{1st,cyc} $ für den Werkstoffzustand T6 und Darstellung der Transienzgrenze	143
--	-----

Tabellenverzeichnis

1.1. Versuchzeiten für jeweils eine Probe in den Bereichen von 10^6 , 10^7 , 10^8 und 10^9 Schwingspielen bei verschiedenen Frequenzen	2
2.1. Legierungsgruppen der Aluminiumknetlegierungen	4
2.2. Formen der Wärmebehandlung bei Aluminiumknetlegierungen	4
2.3. Legierungsgruppen der Aluminiumgusslegierungen nach europäischer Norm DIN EN 1780:2002 [Oste07]	5
2.4. Legierungsgruppen der Aluminiumgusslegierungen nach internationaler Norm ANSI 35.1 (M) [Hess12]	6
2.5. Formen der Wärmebehandlung bei Aluminiumgusslegierungen	6
2.6. Ansatzfunktion zur Beschreibung des Krümmungsverhaltens der HOOKE'schen Geraden nach [Hess91]	13
2.7. Vergleich der Schwingfestigkeiten von Aluminium bei Umgebungsluft und Vakuum [Step58, Harr59]	37
4.1. Chemische Zusammensetzung EN AW-6060	43
4.2. Quasi-statische Kennwerte der Auslagerungszustände	45
6.1. Mittelwerte der Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche mit Standardabweichung	64
6.2. Vergleich der einzelnen Streuungen der Versuchspunkte bei Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN (C. M. & B.) und der Bereiche 1 und 2 der tri-linearen Wöhlerlinie für den Zustand T4	66
6.3. Vergleich der einzelnen Streuungen der Versuchspunkte bei Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN (C. M. & B.) und der Bereiche 1 und 2 der tri-linearen Wöhlerlinie für den Zustand T6	67
6.4. Vergleich der einzelnen Streuungen der Versuchspunkte bei Auswertung nach COFFIN, MANSON und BASQUIN (C. M. & B.) und der Bereiche 1 und 2 der tri-linearen Wöhlerlinie für den Zustand T7	68
6.5. Vergleich der Streuungen der einzelnen Wöhlerlinien der verschiedenen Auslagerungszustände	77
6.6. Ergebnisse der Regression der normierten Wöhlerlinie	79
6.7. Wachstumsraten k_{gr} für die durch die Sättigungsfunktion ermittelten Werte bei verschiedenen Schwingspielzahlen aus Daten von [Harr59, Harr61] und deren gewichteter Mittelwert	88
6.8. Ermittlung der Parameter für die Funktion der ertragbaren Spannungsamplitude $\sigma_{a,f,N}$ in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Schwingspielzahl N für die Daten von [Harr59, Harr61] mit Hilfe eines Programms zur Darstellung mathematischer Funktionen mit konstantem $k_{gr} = 0,003$	89

6.9. Parameter für die Funktion der ertragbaren Spannungsamplitude $\sigma_{a,f,N}$ in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Schwingungszahl N für die Daten der Aluminiumknetlegierung EN AW-6060 T6	89
7.1. Neigungen der tri-linearen Dehnungswöhlerlinie	96
7.2. Werte für σ_{limit} und $\varepsilon_{\text{limit}}$ am Punkt der Transienzgrenze $\Delta\varepsilon_{0,001}$	100
7.3. Schwingungszahlen am Abknickpunkt zum Bereich 3 der Dehnungswöhlerlinie nach tri-linearer Auswertung	101
7.4. Änderung der Dehnungsamplitude verursacht durch den Frequenzeinfluss zwischen 5 Hz und 140 Hz bei $N = 1 \cdot 10^8$	103
7.5. Auswertung der Streubänder des dritten Bereiches der tri-linearen Wöhlerlinie bei $N = 1 \cdot 10^8$	103
7.6. Ergebnisse für den Schwingfestigkeitskoeffizient für tri-Lineare Dehnungswöhlerlinie σ'_{f_3} für EN AW-6060 T4, T6 und T7	105
A.1. Übersicht welche Versuchszeit für das Erreichen einer bestimmten Schwingungszahl im Langzeitfestigkeitsbereich für verschiedene Frequenzen angenommen werden muss	122
A.2. Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 mit einer Versuchsfrequenz von 140 Hz und $R = -1$	123
A.3. Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 mit einer Versuchsfrequenz von 700 Hz und $R = -1$	123
A.4. Versuchsergebnisse der Ultraschallschwingfestigkeitsversuche EN AW-6060 im Zustand T4 mit einer Versuchsfrequenz von 20 kHz und $R = -1$	124
A.5. Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 mit einer Versuchsfrequenz von 140 Hz und $R = -1$	124
A.6. Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 mit einer Versuchsfrequenz von 700 Hz und $R = -1$	124
A.7. Versuchsergebnisse der Ultraschallschwingfestigkeitsversuche EN AW-6060 im Zustand T6 mit einer Versuchsfrequenz von 20 kHz und $R = -1$	125
A.8. Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 mit einer Versuchsfrequenz von 140 Hz und $R = -1$	125
A.9. Versuchsergebnisse der spannungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 mit einer Versuchsfrequenz von 700 Hz und $R = -1$	126
A.10. Auswertungsergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 und $R = -1$	128
A.11. Zyklische Kennwerte für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 und $R = -1$	128
A.12. Auswertungsergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 und $R = -1$	131
A.13. Zyklische Kennwerte für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 und $R = -1$	131
A.14. Auswertungsergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 und $R = -1$	134
A.15. Zyklische Kennwerte für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 und $R = -1$	134

A.16.Quasi-statische Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4	137
A.17.Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T4 aus stabilisierter Hysterese	137
A.18.Quasi-statische Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6	137
A.19.Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T6 aus stabilisierter Hysterese	138
A.20.Quasi-statische Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7	138
A.21.Elastizitätsmodulergebnisse für die dehnungsgeregelten Versuche EN AW-6060 im Zustand T7 aus stabilisierter Hysterese	138
A.22.Auswertung der statischen und zyklischen Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgere- gelten Versuchen für EN AW-6060 T4 in [MPa]	139
A.23.Auswertung der statischen und zyklischen Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgere- gelten Versuchen für EN AW-6060 T6 in [MPa]	139
A.24.Auswertung der statischen und zyklischen Ersatzstreckgrenze aus dehnungsgere- gelten Versuchen für EN AW-6060 T7 in [MPa]	139
A.25.Punkte der Wöhlerlinie aus [Harr59, Harr61] für den Werkstoff L70 bei verschie- denen Frequenzen und Schwingspielzahlen	140
A.26.Ermittlung der Parameter für die Funktion der ertragbaren Spannungsamplitude $\sigma_{a,f,N}$ in Abhängigkeit von der Frequenz f und der Schwingspielzahl N für die Daten von [Harr59, Harr61] mit Hilfe eines Programms zur Darstellung mathe- matischer Funktionen	141
A.27.Spannungsamplitude σ_{limit} im Punkt der Transienzgrenze $ \Delta\varepsilon_{1\text{st,cyc}} $ für den Werkstoffzustand T4	142
A.28.Spannungsamplitude σ_{limit} im Punkt der Transienzgrenze $ \Delta\varepsilon_{1\text{st,cyc}} $ für den Werkstoffzustand T6	143
A.29.Spannungsamplitude σ_{limit} im Punkt der Transienzgrenze $ \Delta\varepsilon_{1\text{st,cyc}} $ für den Werkstoffzustand T7	143
A.30.Versuchergebnisse der Ultraschallschwingfestigkeitsversuche EN AW-6060 im Zu- stand T6 mit einer Versuchsfrequenz von 20 kHz und $R = -1$ auf 5 Hz umgerechnet	144